ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Μελέτη δικτύου μέσης τάσης – Εξομοίωση σφαλμάτων από κεραυνούς

Δ Ι Π Λ Ω Μ Α Τ Ι Κ Η Ε Ρ Γ Α Σ Ι Α

ΚΑΤΕΒΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ
ΠΥΡΓΙΩΤΗ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ
Καθηγήτρια

ΠΑΤΡΑ – Φεβρουάριος 2025

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών.

Κατέβας Ιωάννης

© 2025 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Το σύνολο της εργασίας αποτελεί πρωτότυπο έργο, παραχθέν από τον Κατέβα Ιωάννη, και δεν παραβιάζει δικαιώματα τρίτων καθ' οιονδήποτε τρόπο. Αν η εργασία περιέχει υλικό, το οποίο δεν έχει παραχθεί από τον/την ίδιο/α, αυτό είναι ευδιάκριτο και αναφέρεται ρητώς εντός του κειμένου της εργασίας ως προϊόν εργασίας τρίτου, σημειώνοντας με παρομοίως σαφή τρόπο τα στοιχεία ταυτοποίησής του, ενώ παράλληλα βεβαιώνει πως στην περίπτωση χρήσης αυτούσιων γραφικών αναπαραστάσεων, εικόνων, γραφημάτων κ.λπ., έχει λάβει τη χωρίς περιορισμούς άδεια του κατόχου των πνευματικών δικαιωμάτων για την συμπερίληψη και επακόλουθη δημοσίευση του υλικού αυτού.

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Πιστοποιείται ότι η Διπλωματική Εργασία με τίτλο

Μελέτη δικτύου μέσης τάσης – Εξομοίωση σφαλμάτων από κεραυνούς

του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

ΚΑΤΕΒΑ ΙΩΑΝΝΗ ΤΟΥ **ΝΙΚΟΛΑΟΥ**

Αριθμός Μητρώου: 1057755

Παρουσιάστηκε δημόσια στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών στις

10/02/2025

και εξετάστηκε από την ακόλουθη εξεταστική επιτροπή:

Ελευθερία Πυργιώτη, Καθηγήτρια, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών (Επιβλέπουσα)
Βοβός Παναγής, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών (μέλος)
Καλαντώνης Βασίλειος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών (μέλος)

Η Επιβλέπουσα:	Ο Διευθυντής του τομέα:
Ελευθερία Πυργιώτη **Καθηγήτρια**	**Μητρονίκας Επαμεινώνδας** **Αναπληρωτής Καθηγητής**

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της διπλωματικής μου εργασίας, καθηγήτρια κ. Ελευθερία Πυργιώτη για τις συμβουλές, την καθοδήγηση και το χρόνο που αφιέρωσε ώστε να επιτευχθεί η εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την υποστήριξη που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μελέτη δικτύου μέσης τάσης – Εξομοίωση σφαλμάτων από κεραυνούς

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΦΟΙΤΗΤΗ:
ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΤΕΒΑΣ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑΣ:
ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ ΠΥΡΓΙΩΤΗ

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς εναέριου δικτύου μέσης τάσης με στύλους από οπλισμένο σκυρόδεμα το οποίο υποβάλλεται σε ένα μόνο ή δύο διαδοχικά κεραυνικά πλήγματα σε μία εκ των τριών φάσεων του δικτύου. Το δίκτυο προς μελέτη μοντελοποιήθηκε μέσω του λογισμικού ATPDraw. Το δίκτυο αποτελείται από μία εναέρια γραμμή μέσης τάσης 20 kV, στηριζόμενη σε 20 τσιμεντένιους στύλους ανά 100m. Συνοπτικά, τα κύρια ζητήματα που εξετάστηκαν ήταν: τα χαρακτηριστικά και οι παράμετροι μοντελοποιήσης των κεραυνικών πληγμάτων, των μονωτήρων και των άλλων στοιχείων του δικτύου, η διεξαγωγή σεναρίων δομικών μέσω προσομοίωσης με το λογισμικό ATPDraw, η καταγραφή και ανάλυση των αποτελεσμάτων για τις υπερτάσεις και το χρόνο αποκατάστασης του δικτύου σε διάφορα σημεία του και η εξαγωγή συμπερασμάτων για τις επίδραση των κεραυνικών πληγμάτων.

Στο **1ο Κεφάλαιο** παρουσιάζεται το φαινόμενο του κεραυνού. Γίνεται λεπτομερής ανάλυση της διαδικασίας δημιουργίας του. Επίσης γίνεται βασισμένη στη βιβλιογραφία ανάλυση των κατηγοριών και ακολουθιών των κεραυνικών πληγμάτων ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους μεγέθη και παρατίθενται οι μαθηματικές εκφράσεις που τα διέπουν στις οποίες βασίζεται η μοντελοποίησή τους στο λογισμικό προσομοίωσης στο 5ο Κεφάλαιο.

Το **2ο Κεφάλαιο** αφορά τους μονωτήρες στήριξης εναέριων γραμμών μεταφοράς. Παρουσιάζεται η διαδικασία διάσπασης του αέρα μεταξύ των άκρων των μονωτήρων και η διαδικασία που οδηγεί στην υπερπήδηση ή διάτρησή τους. Επίσης γίνεται αναλυτική παρουσίαση των μεθόδων που έχουν κατά καιρούς προταθεί για τη μαθηματική μοντελοποίησή της διαδικασίας υπερπήδησης μονωτήρων. Οι μέθοδοι αυτοί χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση των μονωτήρων στο λογισμικό προσομοίωσης στο 5ο Κεφάλαιο.

Στο **3ο Κεφάλαιο** γίνεται επιλογή του στύλου στήριξης, της διάταξης του εναερίου δικτύου και των αγωγών του. Για αυτά γίνεται ανάλυση του τρόπου μοντελοποίησης των χαρακτηριστικών τους. Παρατίθεται ο υπολογισμός των ωμικών, χωρητικών και επαγωγικών αντιστάσεων και άλλων παραμέτρων που χαρακτηρίζουν ηλεκτρικά τους στύλους στήριξης από οπλισμένο σκυρόδεμα καθώς και ο υπολογισμός των γεωμετρικών και ηλεκτρικών παραμέτρων της εναέριας γραμμής. Οι υπολογισμοί αυτοί χρησιμοποιούνται στο 5ο Κεφάλαιο.

Στο **4ο Κεφάλαιο** γίνεται αναλυτική μοντελοποίηση των κεραυνικών πληγμάτων και των μονωτήρων στο λογισμικό ATPDraw. Δημιουργείται μοντέλο κεραυνικών πληγμάτων που

περιλαμβάνει διαδοχικά κεραυνικά πλήγματα και πραγματοποιούνται δοκιμές του. Επίσης, μετά από εκτενή ανάλυση των μοντέλων μονωτήρων από την βιβλιογραφία, γίνονται προσαρμογές τους, προτάσεις βελτιώσεων και αναλυτικές δοκιμές τους συνδυαστικά με τα μοντέλα κευρανικών πληγμάτων. Τα μοντέλα που δημιουργούνται εδώ χρησιμοποιούνται στο 5^{ο} Κεφάλαιο.

Στο **5^{ο} Κεφάλαιο** γίνεται μια σύντομη γενική αναφορά στο λογισμικό ATPDraw. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα στοιχεία που επιλέχθηκαν να απαρτίσουν το τελικό προς μελέτη δίκτυο και εξηγείται ο τρόπος της μοντελοποίησης και η επιλογή των παραμέτρων τους. Επίσης εδώ παρουσιάζεται η συνολική τελική διάταξη της προσομοίωσης. Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται για τις δοκιμές στο 6^{ο} Κεφάλαιο.

Στο **6^{ο} Κεφάλαιο** ξεκινά με την παρουσίαση των σεναρίων των δοκιμών τα οποία συνοπτικά περιλαμβάνουν ένα ή δύο διαδοχικά κεραυνικά πλήγματα σε κάθε μία από τις τρεις φάσεις δικτύου μέσης τάσης 20 kV. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών και καταγράφονται δεδομένα για το χρόνο αποκατάστασης έως την κανονική λειτουργία και των υπερτάσεων ανά φάση σε διαφορετικά σημεία του δικτύου.

Στο **7^{ο} Κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα δεδομένα των αποτελεσμάτων των δοκιμών που έγιναν στο 6^{ο} Κεφάλαιο. Στη συνέχεια γίνεται σχολιασμός και προσπάθεια ερμηνείας των αποτελεσμάτων των δοκιμών και εξάγονται συμπεράσματα για παραμέτρους όπως ο χρόνος αποκατάστασης του δικτύου, η επίδραση των πληγμάτων ανά φάση, η επίδραση των πρώτων και ακόλουθων πληγμάτων κλπ.

Η εργασία ολοκληρώνεται με τη **Βιβλιογραφία** που χρησιμοποιήθηκε και **Παράρτημα** στο οποίο παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών.

EXTENSIVE ENGLISH SUMMARY

Study of medium voltage grid – Lightning faults simulation

STUDENT | SUPERVISOR

IOANNIS KATEVAS | **ELETHERIA PYRGIOTI**

The subject of this thesis is the study of the transient behaviour of an overhead medium-voltage network on reinforced concrete poles, subjected to one or two consecutive lightning strikes on one of the three phases of the network. The network under study was modelled using the ATPDraw software. It consists of a 20 kV overhead medium-voltage line supported by 20 concrete poles, 1 per 100 meters. In summary, the main issues examined include the characteristics and modelling parameters of lightning strikes, insulators, and other network elements, the conduction of tests' scenarios through simulation in ATPDraw, the recording and analysis of results for overvoltages and network recovery times at various network points, and the extraction of conclusions about the effects of lightning strikes.

Chapter 1 presents the phenomenon of lightning by a detailed analysis of its formation process. Additionally, a literature-based analysis of the categories and sequences of lightning strikes is provided, depending on their characteristics, along with the mathematical expressions governing them, which form the basis for their modelling in the simulation as in Chapter 5.

Chapter 2 examines the air breakdown process between the insulators ends and the process leading to their flashover or puncture. It also includes a detailed presentation of methods proposed over time for the mathematical modelling of the flashover process of insulators. These methods are used for insulator modelling in the simulation software as in Chapter 5.

In **Chapter 3** the selection of the supporting pole, the layout of the overhead network, and its conductors are addressed. The modelling of their characteristics is analysed, including the calculation of resistive, capacitive, and inductive parameters and other properties that electrically characterize reinforced concrete poles, as well as the calculation of the geometric and electrical parameters of the overhead line. These calculations are used in Chapter 5.

Chapter 4 focuses on the detailed modelling of lightning strikes and insulators in ATPDraw. A lightning strike model is created, including consecutive strikes, and tests are conducted. Additionally, after an extensive analysis of insulator models from the literature, adaptations, improvement proposals, and detailed tests are performed in combination with the lightning strike models. The models developed here are used in Chapter 5.

In **Chapter 5**, a brief general introduction to the ATPDraw software is provided. Then, the components selected for the final network to be studied are presented, and the modelling process and parameter selection are explained. Furthermore, the overall final simulation layout is presented. This layout is used for the tests in Chapter 6.

Chapter 6 begins with the presentation of test scenarios, which include one or two consecutive lightning strikes on each of the three phases of the 20 kV medium-voltage

network. Subsequently, the test results are analysed in detail, and data are recorded for recovery times to normal operation and overvoltages per phase at various points of the network.

Chapter 7 presents the data from the test results in Chapter 6. A commentary and interpretation of the test results are provided, and conclusions are drawn regarding parameters such as network recovery time, the impact of strikes on each phase, the effect of primary and subsequent strikes, etc.

The thesis concludes with the **Bibliography** used and an **Appendix** containing the **Test Results**.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 6
1ο Κεφάλαιο: Ο Κεραυνός 14
1.1 Το φαινόμενο των ατμοσφαιρικών ηλεκτρικών εκκενώσεων 14
1.2 Κεραυνοί 15
1.3 Στάδια Εξέλιξης Κεραυνικού Φαινομένου 16
1.3.1 Στάδιο 1ο: Προεκκένωση – Δημιουργία Οχετού (ή Οχετών) 16
1.3.2 Στάδιο 2ο: Ανάπτυξη Βηματικών Οχετών 16
1.3.3 Στάδιο 3ο: Ανάπτυξη Ανερχόμενων Οχετών 17
1.3.4 Στάδιο 4ο: Δημιουργία Αγώγιμης Διαδρομής 17
1.3.5 Στάδιο 5ο: Πρώτο Πλήγμα Επιστροφής 18
1.3.6 Στάδιο 6ο: Ακόλουθοι Οχετοί / Ακόλουθα Πλήγματα Επιστροφής 18
1.4 Κατηγορίες Κεραυνών 20
1.4.1 Κεραυνοί μεταξύ νεφών και Κεραυνοί εντός νέφους 20
1.4.2 Κεραυνοί μεταξύ νέφους και εδάφους 20
1.4.3 Χρονική Εξέλιξη Σταδίων και Ακόλουθα Πλήγματα 22
1.5 Ρεύμα Κευρανικών Πληγμάτων 23
1.5.1 Επιπτώσεις Ρεύματος Πληγμάτων και Σχετικές Παράμετροι Ρεύματος 23
1.5.2 Μορφή Ρευμάτων Πλήγματος 23
1.5.3 Βραχύ Πλήγμα (Κρουστικό Πλήγμα) 24
1.5.4 Μακρύ Πλήγμα (Συνεχές Πλήγμα) 25
1.6 Μαθηματική έκφραση Βραχέως Πλήγματος 26
1.6.1 Διπλοεκθετική Συνάρτηση 26
1.6.2 Συνάρτηση Heidler 27
1.7 Μέγιστες τιμές παραμέτρων ρεύματος στο πρότυπο IEC 62305-1 29
1.8 Στατιστικά Δεδομένα για τα Κεραυνικά Πλήγματα 31
1.8.1 Πιθανές Ακολουθίες Πρώτων και Ακόλουθων Πληγμάτων 31
1.8.2 Χρόνοι 32
1.8.3 Μέγιστα Ρεύματα και Ρυθμοί Ανόδου 32
1.8.4 Πιθανές τιμές παραμέτρων ρεύματος πλήγματος 32
2ο Μονωτήρες 34
2.1 Γενικά 34
2.2 Ηλεκτρική Διάσπαση μονωτήρων - Υπερπήδηση 34
2.2.1 Διάτρηση Μονωτήρα 34
2.2.2 Υπερπήδηση Μονωτήρα 35

2.2.3 Διαδικασία Διάσπασης Αέρα 35
2.3 Μοντελοποίηση και Μαθηματικές Εκφράσεις Υπερπήδησης Μονωτήρων 37
2.3.1 Καμπύλες Τάσης-Χρόνου (V-t) 37
2.3.2 Μέθοδος Ολοκλήρωσης 39
2.3.3 Μοντέλα Ανάπτυξης Οχετού 40
3ο Κεφάλαιο: Στύλοι Στήριξης και Αγωγοί Εναερίων Γραμμών Μέσης Τάσης 46
3.1 Στύλοι στήριξης εναερίων γραμμών μεταφοράς μέσης τάσης 46
3.1.1 Επιλογή στύλου στήριξης 46
3.1.2 Υπολογισμοί ηλεκτρικών παραμέτρων στύλων από οπλισμένο σκυρόδεμα ... 47
3.1.3 Υπολογισμός επαγωγικής αντίστασης πλέγματος χάλυβα 47
3.1.4 Υπολογισμός ωμικής αντίστασης πλέγματος χάλυβα 49
3.1.5 Υπολογισμός ωμικής αντίστασης σκυροδέματος 50
3.1.6 Υπολογισμός χωρητικότητας τμημάτων στύλου και εδάφους 52
3.2 Αγωγοί εναερίων γραμμών μεταφοράς μέσης τάσης 52
3.2.1 Γενικά για τους αγωγούς στις εναέριες γραμμές μέσης μεταφοράς 52
3.2.2 Εναέριοι αγωγοί αλουμινίου με χαλύβδινη ψυχή (ACSR) 53
3.2.3 Επιλογή αγωγών μεταφοράς 54
3.2.4 Επιλογή διάταξης αγωγών μεταφοράς – Υπολογισμός αποστάσεων αγωγών 54
3.2.5 Υπολογισμός μέσου ύψους αγωγών - βέλος κάμψης 56
4ο Κεφάλαιο: Μοντελοποίηση Κευρανικών Πληγμάτων και Μονωτήρων 58
4.1 Κεραυνικά Πλήγματα Δοκιμών 58
4.1.1 Ακολουθίες Πληγμάτων 58
4.1.2 Παράμετροι πληγμάτων δοκιμών 58
4.2 Προσομοίωση κεραυνικού πλήγματος στο ATP EMPT 60
4.3 Μονωτήρες Δοκιμών 63
4.4 Προσομοίωση Μονωτήρων στο ATP-EMTP 64
4.4.1 Προσομοίωση με χρήση Καμπύλης Τάσης-Χρόνου 64
4.4.2 Προσομοίωση με χρήση της Μεθόδου Ανάπτυξης Οχετού 74
4.4.3 Σύγκριση Προσομοιώσεων με Καμπύλη Τάσης-Χρόνου/Μέθοδο Ανάπτυξης Οχετού 78
5ο Κεφάλαιο Περιβάλλον Προσομοίωσης και Μοντελοποίηση Δικτύου 80
5.1 Το λογισμικό ATP – EMTP / ATPDraw 80
5.2 Μοντελοποίηση στοιχείων δικτύου μέσης τάσης 81
5.2.1 Γεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης 81
5.2.2 Γραμμή μεταφοράς μέσης τάσης 20 kV 83

5.2.3 Στύλοι από ενισχυμένο σκυρόδεμα 86
5.2.4 Αντίσταση γείωσης στύλου 88
5.2.5 Μονωτήρες εναέριας γραμμής 88
5.2.6 Κρουστική γεννήτρια κεραυνικών πληγμάτων 88
5.2.7 Εμπεδήσεις Προσαρμογής 88
5.3 Συνολική διάταξη προσομοίωσης 90
6ο Κεφάλαιο: Προσομοίωση 92
6.1 Σενάρια προσομοίωσης 92
6.2 Κανονική Λειτουργία 93
6.3 Δοκιμές 93
6.3.1 Σενάριο 1 (K.2.a_A) 93
6.3.2 Σενάριο 2 (K.2.a_B) 102
6.3.3 Σενάριο 3 (K.2.a_C) 111
6.3.4 Σενάριο 4 (K.2.b_A) 117
6.3.5 Σενάριο 5 (K.2.b_B) 127
6.3.6 Σενάριο 6 (K.2.b_C) 136
7ο Κεφάλαιο: Συμπεράσματα 146
7.1 Αποτελέσματα Δοκιμών 146
7.2 Συμπεράσματα: Χρόνος Αποκατάστασης 150
7.3 Συμπεράσματα: Επίδραση πληγμάτων ανά Φάση 150
7.4 Συμπεράσματα: Επίδραση πληγμάτων ανά Στύλο 151
7.5 Συμπεράσματα: Επίδραση Πρώτων και Ακόλουθων Πληγμάτων 151
7.6 Συμπεράσματα: Επίδραση Πληγμάτων ανάλογα με την τιμή τάσης 151
Βιβλιογραφία 153
Παράρτημα – Αποτελέσματα Δοκιμών 157

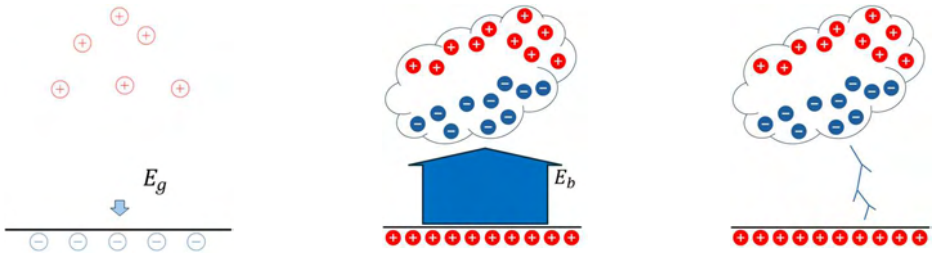
1 Κεφάλαιο: Ο Κεραυνός

1.1 Το φαινόμενο των ατμοσφαιρικών ηλεκτρικών εκκενώσεων

Οι μηχανισμοί δημιουργίας των ατμοσφαιρικών ηλεκτρικών εκκενώσεων που συχνά αναφέρονται ως κεραυνοί ή και αστραπές είναι αρκετά περίπλοκοι και δεν έχουν πλήρως κατανοηθεί (Gönen, 2014).

Είναι όμως γενικά αποδεκτό ότι προκαλούνται λόγω της δημιουργίας ηλεκτρικών διπόλων στα νέφη ως αποτέλεσμα των καιρικών φαινομένων (Πυργιώτη, 2022). Τα καιρικά φαινόμενα που δημιουργούν τα ηλεκτρικά δίπολα είναι αρκετά περίπλοκα. Κατά κανόνα πρόκειται για έντονα αέρια ανοδικά ή καθοδικά ρεύματα σε συνθήκες κακοκαιρίας (βροχή) τα οποία δημιουργούν ηλεκτροστατικά πεδία στα νέφη λόγω της τριβής ανάμεσα στα κινούμενα σταγονίδια βροχής ή πάγου που κατά την κίνησή τους τα αέρια ρεύματα μεταφέρουν. Οι παγοκρύσταλλοι είναι θετικά φορτισμένοι ενώ τα σταγονίδια της βροχής αρνητικά. (Gönen, 2014).

Γενικά, χωρίς όμως να συμβαίνει σε κάθε περίπτωση, ως αποτέλεσμα προκύπτει ένα νέφος με θετικά φορτισμένα σωματίδια στην κορυφή του (προς την ατμόσφαιρα) και αρνητικά στην βάση του (προς τη γη) (Πυργιώτη, 2022) (Gönen, 2014). Αυτός ο διαχωρισμός των φορτίων συσχετίζεται και με τις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες των παγοκρυστάλλων που κατά την επαφή τους με τα σταγονίδια της βροχής μπορούν να προκαλέσουν κατά περίπτωση και την μετατροπή των σταγονιδίων της βροχής σε πάγο και την ανατροφοδότηση του φαινομένου. Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται δεν είναι ομοιόμορφο. Μεγιστοποιείται στα σημεία που μεγιστοποιείται η συγκέντρωση των αντίθετων φορτίων (Gönen, 2014).



Σχήμα 1-1 Ηλεκτρικό πεδίο σε συνθήκες (α) καλοκαιρίας, (β) κακοκαιρίας, (γ) ηλεκτρική εκκένωση - κεραυνός

Έτσι, ενώ σε συνθήκες καλοκαιρίας η γη εμφανίζεται μόνιμα φορτισμένη με αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο της τάξης των 5x10^5 C με ηλεκτρικό πεδίο με ένταση περίπου $E_g = 0.13\ \mathrm{kV/m}$ (με κατεύθυνση από την ατμόσφαιρα προς τη γη) (Πυργιώτη, 2022) (Gönen, 2014) (α)), σε συνθήκες κακοκαιρίας και μετά τη δημιουργία νεφών με ηλεκτρικά δίπολα, εξ επαγωγής θετικά φορτία συγκεντρώνονται κάτω από την αρνητικά φορτισμένη βάση του νέφους και προοδευτικά το ηλεκτρικό πεδίο αντιστρέφεται και μπορεί να φτάσει σε τιμές $E_b = 10\ \mathrm{kV/m}$ (με κατεύθυνση από την γη προς την ατμόσφαιρα) (Gönen, 2014) (Πυργιώτη, 2022).

Αυτές οι υψηλές τιμές έντασης του ηλεκτρικού πεδίου συνδυαζόμενες με τη χαμηλή πυκνότητα του αέρα (λόγω του ύψους του νέφους, περίπου 1 έως 6 km από το έδαφος (Shivalli, 2016) αλλά και άλλους παράγοντες, μπορούν να προκαλέσουν έναρξη ιονισμού των μορίων του αέρα επιτρέποντας στα αρνητικά φορτία να κινηθούν ελεύθερα. Ο ιονισμός

αυτός αποτελεί το πρόδρομο στάδιο για την έναρξη της ηλεκτρικής εκκένωσης (Πυργιώτη, 2022).

Όταν η ένταση του πεδίου γίνει της τάξης των 5–10 kV/cm (Gönen, 2014) (εξαρτώμενο και από άλλες συνθήκες), η διηλεκτρική αντίσταση του αέρα διασπάται και προκαλείται ηλεκτρική εκκένωση από το νέφος προς τη γη (Gönen, 2014) (Πυργιώτη, 2022), δηλαδή παρατηρείται το φαινόμενο του κεραυνού. Αντίστοιχη είναι η διαδικασία εκδήλωσης των ηλεκτρικών εκκενώσεων που παρατηρούνται ανάμεσα σε διαφορετικά νέφη ή και μέσα στο ίδιο νέφος και γενικά ανάμεσα σε τοπικές περιοχές στην ατμόσφαιρα ή στην ατμόσφαιρα και στο έδαφος, τμήματα των οποίων είναι αντίθετα φορτισμένα και εμφανίζουν υψηλές τιμές έντασης ηλεκτρικού πεδίου.

Η διάσπαση του αέρα συνοδεύεται και από άλλα φαινόμενα όπως έντονη λάμψη, ήχο, θερμότητα, διατάραξη του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου κλπ. που παρατηρούνται κατά την εκδήλωση των κεραυνών (Πυργιώτη, 2022). Αυτά είναι αποτελέσματα των στιγμιαίων και έντονων ανταλλαγών φορτίων ανάμεσα στο νέφος και το έδαφος ή ανάμεσα σε αντίθετα φορτισμένες περιοχές στην ατμόσφαιρα. Τα στάδια από το πρώτο βήμα ιονισμού του αέρα και την έναρξη της ηλεκτρικής εκκένωσης μέχρι την (μερική) αποκατάσταση της ισορροπίας των φορτίων είναι πολλά. Θα αναλυθούν περισσότερο στην παράγραφο 1.3.

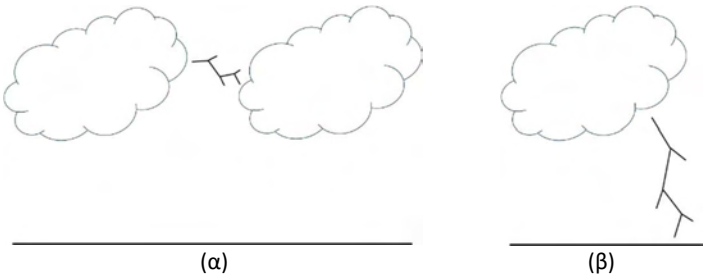
1.2 Κεραυνοί

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλεκτρικών εκκενώσεων (Gönen, 2014) (Πυργιώτη, 2022) (Rubiano-Cruz, et al., 2021) που παρατηρούνται ως αποτέλεσμα καιρικών φαινομένων.

Διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

(α) τις ηλεκτρικές εκκενώσεις που παρατηρούνται αποκλειστικά στην ατμόσφαιρα (σύννεφα) είτε μέσα σε ένα σύννεφο είτε ανάμεσα σε δύο σύννεφα και

(β) τις ηλεκτρικές εκκενώσεις που παρατηρούνται ανάμεσα στην ατμόσφαιρα (σύννεφα) και το έδαφος.



Σχήμα 1-2 (α) Κεραυνός ανάμεσα σε δύο νέφη, (β) Κεραυνός ανάμεσα σε νέφος και στο έδαφος, με προσαρμογή από το (Rubiano-Cruz, et al., 2021)

Τα φαινόμενα που προκαλούν τους Κεραυνούς δημιουργούνται σε νέφη που βρίσκονται σε μεγάλα ύψη, άνω των 1 έως 6 km (Shivalli, 2016) αρκετά μακριά από τα δίκτυα μεταφοράς. Για αυτό και οι Κεραυνοί μεταξύ νεφών δεν θα μας απασχολήσουν καθώς οι επιπτώσεις τους στα δίκτυα μεταφοράς θεωρούνται αμελητέες. Όμως για λόγους πληρότητας θα γίνει στην παράγραφο 1.4.1 μια σύντομη αναφορά και στους Κεραυνούς μεταξύ νεφών.

Οι Κεραυνοί μεταξύ νέφους και εδάφους αποτελούν περίπου το 20% (Rubiano-Cruz, et al., 2021) των συνολικών ατμοσφαιρικών εκκενώσεων που παρατηρούνται. Το ενδιαφέρον της εργασίας εστιάζεται στους Κεραυνούς με πλήγμα στο έδαφος (στη συνέχεια απλά ως Κεραυνοί) καθώς αυτοί μπορούν να προκαλέσουν πλήγματα και να επηρεάσουν τα δίκτυα

μεταφοράς κατά την ηλεκτρική εκκένωση φορτίων από τα σύννεφα προς το έδαφος. Σε αυτό το φαινόμενο εστιάστηκε και η ανάλυση στην παράγραφο 1.1.

1.3 Στάδια Εξέλιξης Κεραυνικού Φαινομένου

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μια γενική και μη εξαντλητική προσπάθεια περιγραφής των σταδίων εξέλιξης του κεραυνικού φαινομένου περιγράφοντας το φαινόμενο για έναν τυπικό Κεραυνό (πιο συγκεκριμένα τον Κατερχόμενο Αρνητικό ο οποίος θα ορισθεί μεταξύ άλλων στην παράγραφο 1.4.2).

1.3.1 Στάδιο 1ο: Προεκκένωση – Δημιουργία Οχετού (ή Οχετών)

Κατά το στάδιο της προεκκένωσης, οι υψηλές εντάσεις σε συνδιασμό με τη μικρή πυκνότητα του αέρα(λόγω του ύψους) και μερικούς άλλους παράγοντες που προκαλούν πρόσθετη τοπική ενίσχυση του ηλεκτρικού πεδίου, μπορούν να προκαλέσουν έναρξη ιονισμού των μορίων του αέρα από κρούσεις ηλεκτρονίων (Πυργιώτη, 2022).

Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζεται ένας αρχικός ***Οχετός*** (Πυργιώτη, 2022) και κινείται προς τη γενική κατεύθυνση που επιβάλει το ηλεκτρικό πεδίο με ταχύτητες της τάξης των $2x10^5$ m/s (Gönen, 2014). Είναι πιθανό να δημιουργηθούν περισσότεροι του ενός Οχετοί σε διαφορετικές κατευθύνσεις προς τη γενική κατεύθυνση που επιβάλει το ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα στις περιοχές υψηλής πυκνότητας συγκέντρωσης αντίθετων φορτίων (στο νέφος αρνητικά και το έδαφος θετικά).

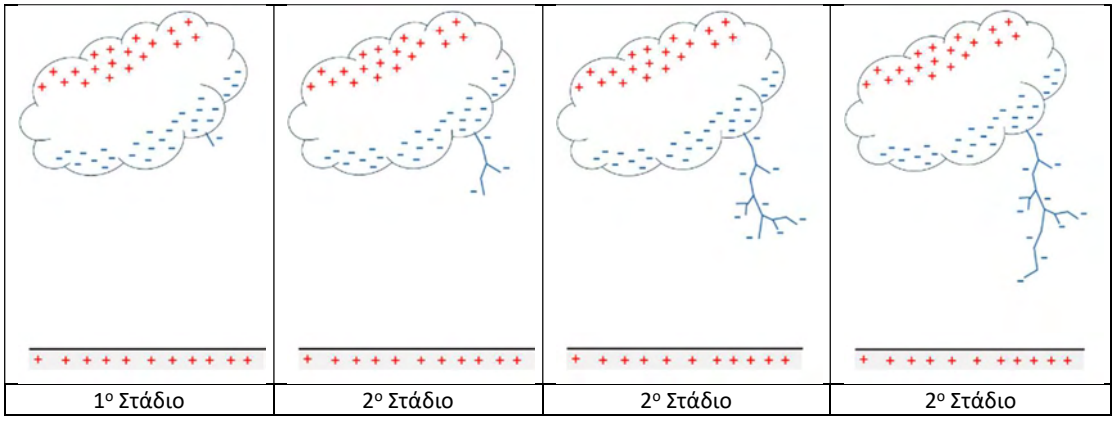
1.3.2 Στάδιο 2ο: Ανάπτυξη Βηματικών Οχετών

Καθώς εξελίσσεται το φαινόμενο ο αρχικός Οχετός (ή οι Οχετοί, αν έχουν δημιουργηθεί περισσότεροι του ενός) κινείται με άλματα της τάξης των 3 έως 50 m (Πυργιώτη, 2022) (Berger, June 1967) ή και διακλαδίζεται. Οι Οχετοί αυτοί, αν δημιουργηθούν περισσότεροι του ενός και οι διακλαδώσεις τους καλούνται ***Βηματικοί Οχετοί*** (Stepped Leaders) και συνεχίζουν να κινούνται μέσα σε ένα ανομοιόμορφο ηλεκτρικό πεδίο που διαμορφώνεται δυναμικά, προκαλώντας τοπικές ηλεκτρικές εκκενώσεις ανάλογα με τη διαμόρφωση των συγκεντρώσεων των φορτίων στο διάκενο.

Καθώς το φαινόμενο είναι δυναμικό και τα τοπικά πεδία αλλάζουν συνεχώς, οι Βηματικοί Οχετοί κινούνται σε διάφορες διευθύνσεις, δηλαδή προς τις κατευθύνσεις που υπάρχουν αντίθετα φορτία από αυτά που φέρουν. Ενώ οι Βηματικοί Οχετοί κινούνται προς τη γενική κατεύθυνση της μεγάλης πυκνότητας αντίθετων φορτίων από αυτά που φέρουν (από το νέφος προς τη γη) αυτή η κίνηση μπορεί να διαταραχθεί λόγω της ύπαρξής τοπικών αντίθετων φορτίων και εμφανίζονται να κινούνται τοπικά λόγω των τοπικών πεδίων και με άλματα προκαλώντας τοπικές εκκενώσεις φορτίων. Όσο κατά τις τοπικές εκκενώσεις οι Βηματικοί Οχετοί δεν εξαντλούν τα φορτία που φέρουν τα οποία και τροφοδοτούνται από την πηγή δημιουργίας τους (το νέφος), συνεχίζουν να κινούνται με άλματα.

Οι τοπικές αυτές εκκενώσεις προκαλούν λάμψεις οι οποίες όμως λόγω της μικρής τους έντασης μπορεί να μην είναι ευδιάκριτες με γυμνό μάτι αλλά παρατηρούνται ως διαδοχικά κινούμενες από το σημείο δημιουργίας του Οχετού (νέφος) προς την περιοχή μεγάλης πυκνότητας αντίθετων φορτίων (έδαφος).

Λόγω της μεταβλητότητας του πεδίου είναι πιθανό να παύσει η εξέλιξη του φαινομένου (εξάντληση των φορτίων του νέφους) πριν κάποιος από τους Βηματικούς Οχετοί φτάσει σε σημείο με μεγάλη πυκνότητα συγκέντρωσης αντίθετων φορτίων (στο έδαφος).



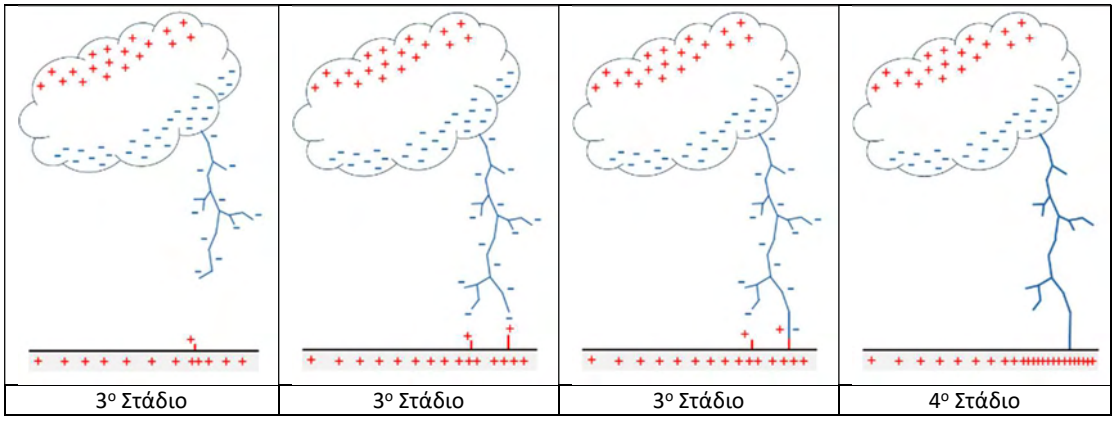
Σχήμα 1-3 Στάδια Εξέλιξης Κεραυνικού Φαινομένου – 1ο και 2ο Στάδιο

1.3.3 Στάδιο 3ο: Ανάπτυξη Ανερχόμενων Οχετών

Καθώς οι διακλαδώσεις των Βηματικών Οχετών προσεγγίζουν την περιοχή με μεγάλη πυκνότητα συγκέντρωσης αντίθετων φορτίων (το έδαφος) αυξάνονται οι ηλεκτρικές δυνάμεις μεταξύ των άκρων των Βηματικών Οχετών και των πλησιέστερων προς αυτά αντίθετα φορτισμένων σωμάτων (π.χ. ψηλά κτίρια, δέντρα στο έδαφος). Οι δυνάμεις αυτές εξαναγκάζουν τα σώματα αυτά (πχ. κτίρια, δέντρα κλπ.) και τον αέρα κοντά τους να φορτιστεί αντίθετα (θετικά) σε σχέση με το φορτίο που φέρουν οι Βηματικοί Οχετοί. Έτσι, κατά αντιστοιχία με τη δημιουργία του Οχετού (στο νέφος) και όταν το πεδίο στο έδαφος γίνει μεγαλύτερο από 1.5 έως 2 kV/m (Πυργιώτη, 2022), δημιουργούνται σταδιακά και με διάφορες εντάσεις ***Ανερχόμενοι Οχετοί*** (upward streamers) ανερχόμενοι από το έδαφος προς την ατμόσφαιρα.

1.3.4 Στάδιο 4ο: Δημιουργία Αγώγιμης Διαδρομής

Όταν κάποιος από τους Βηματικούς Οχετούς, που θα καλείται ***Κεντρικός Οχετός***, έρθει σε επαφή με τον πλησιέστερο σε αυτόν Ανερχόμενο Οχετό δημιουργείται μια αγώγιμη διαδρομή ιονισμένου αέρα ανάμεσα στις αντίθετα φορτισμένες περιοχές υψηλής πυκνότητας φορτίων (αρνητικά φορτισμένο νέφος – θετικά φορτισμένο έδαφος) μέσω του οποίου τα φορτία μπορούν να κινηθούν ελεύθερα.

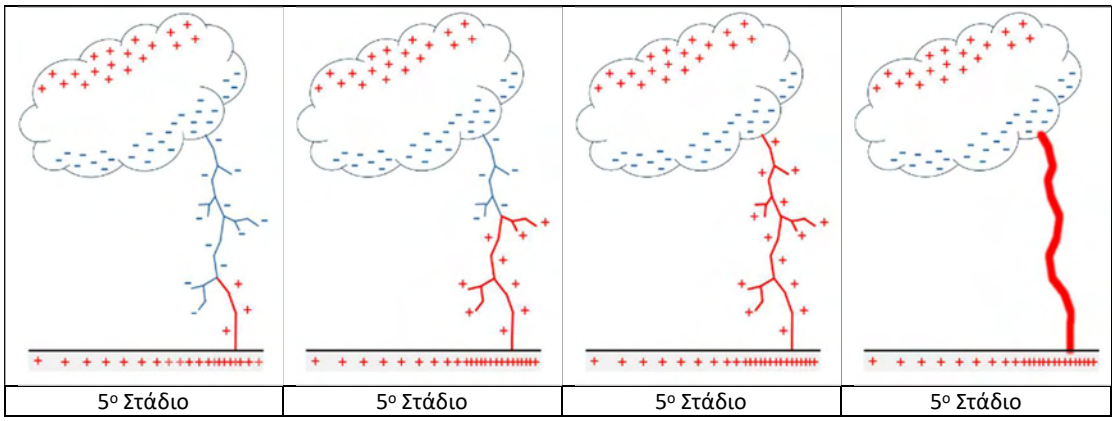


Σχήμα 1-4 Στάδια Εξέλιξης Κεραυνικού Φαινομένου – 3ο και 4ο Στάδιο

1.3.5 Στάδιο 5ο: Πρώτο Πλήγμα Επιστροφής

Με τη δημιουργία της αγώγιμης διαδρομής το ηλεκτρικό φορτίο (αρνητικό φορτίο), που έχει συσσωρευτεί κατά τη δημιουργία του Κεντρικού Οχετού και όλων των ενεργών διακλαδώσεών του, εξουδετερώνεται από τα φορτία της περιοχής υψηλής πυκνότητας αντίθετων φορτίων (θετικά φορτισμένο έδαφος). Ο Κεντρικός Οχετός και οι ενεργές διακλαδώσεις του - αυτές δηλαδή οι διακλαδώσεις στις οποίες τα φορτία δεν έχουν εξουδετερωθεί πλήρως από τα τοπικά πεδία - φέρουν αρνητικά φορτία (βάση του νέφους) ενώ η περιοχή υψηλής πυκνότητας αντίθετων φορτίων θα φέρει θετικά φορτία (θετικά φορτισμένο έδαφος).

Η ύπαρξη αγώγιμης διαδρομής θα προκαλέσει τη στιγμιαία ροή αρνητικών φορτίων από το σημείο δημιουργίας του Κεντρικού Οχετού προς το σημείο δημιουργίας του Ανερχόμενου Οχετού (από το νέφος προς το έδαφος) το οποίο καλείται ***Πρώτο Πλήγμα Επιστροφής*** ή αλλιώς **πρωτογενές** (Κεραυνικό Πλήγμα) με συμβατική φορά ρεύματος την αντίθετη (από το έδαφος προς το νέφος).



Σχήμα 1-5 Στάδια Εξέλιξης Κεραυνικού Φαινομένου – 5ο Στάδιο

Η στιγμιαία εξουδετέρωση φορτίων (ηλεκτρική εκκένωση) που προκαλεί η ύπαρξη αγώγιμης διαδρομής προκαλεί έντονη λάμψη (αστραπή), παρατηρείται εύκολα με γυμνό μάτι και συνοδεύεται από δυνατό κρότο (βροντή). Η λάμψη αυτή είναι πολύ εντονότερη και διαμορφώνεται με αντίθετη φορά από τη φορά με την οποία αναπτύσσονται οι λάμψεις κατά το Στάδιο Ανάπτυξης Βαθμιαίων Οχετών (από το έδαφος προς το νέφος). Για το λόγο αυτό το Στάδιο Ηλεκτρικής Εκκένωσης καλείται και *Πλήγμα Επιστροφής* (Return Stroke).

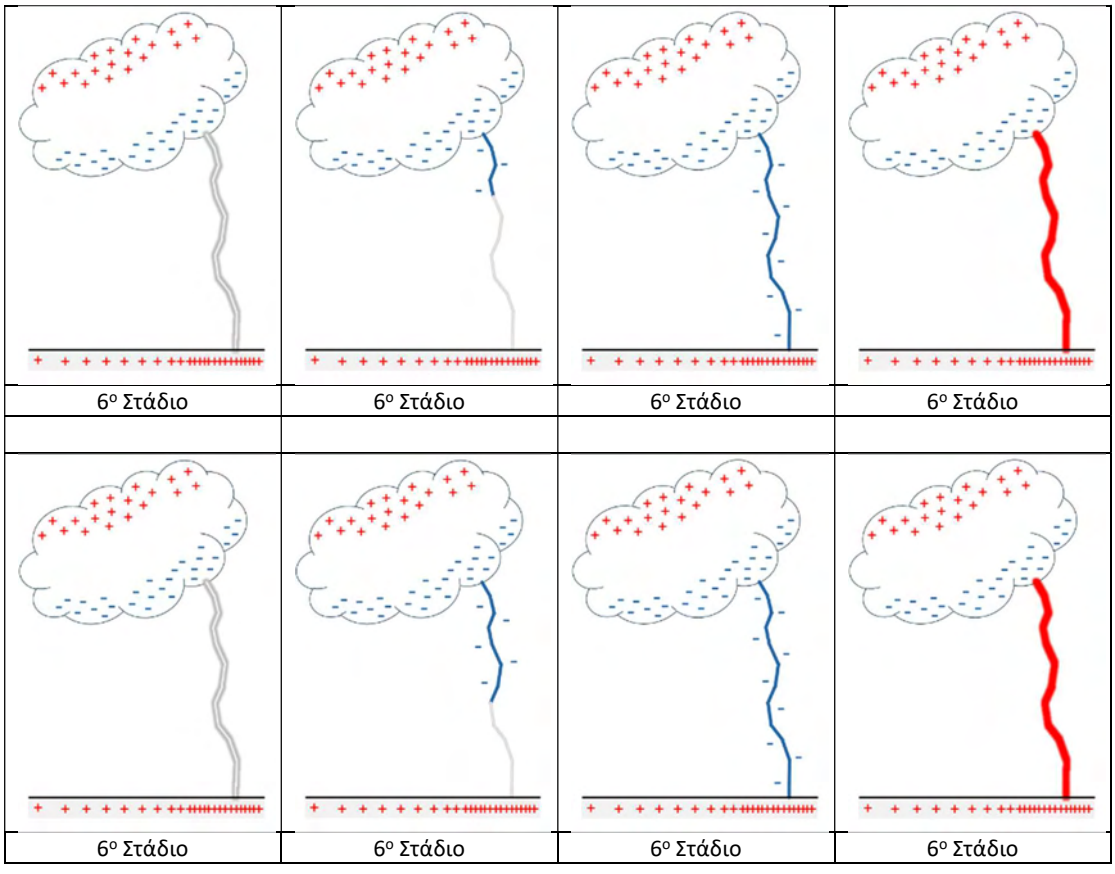
1.3.6 Στάδιο 6ο: Ακόλουθοι Οχετοί / Ακόλουθα Πλήγματα Επιστροφής

Λίγο μετά την εξουδετέρωση όλων των φορτίων του Κεντρικού Οχετού, όπως στο Στάδιο Πρώτου Πλήγματος Επιστροφής, η διαδρομή του ιονισμένου αέρα εξακολουθεί να είναι αγώγιμη και είναι πιθανό να χρησιμοποιηθεί από γειτονικούς Βηματικούς Οχετούς που δεν κατάφεραν να έρθουν σε επαφή με κάποιον Ανερχόμενο Οχετό για τη δημιουργία μιας νέας αγώγιμης διαδρομής, σε μια παραλλαγή της διαδικασίας του Σταδίου Δημιουργίας Αγώγιμης Διαδρομής χωρίς όμως πλέον την ανάγκη ύπαρξης Ανερχόμενου Οχετού. Κάτι τέτοιο προϋποθέτει διαθεσιμότητα πλεονάζοντος φορτίου στην πηγή δημιουργίας του Κεντρικού Οχετού (νέφος).

Επίσης, υπό την υπόθεση ύπαρξης επιπλέον φορτίων και σχεδόν ταυτόχρονα με την πρώτη ηλεκτρική εκκένωση, ο αγώγιμος δρόμος που έχει ήδη δημιουργηθεί στο Στάδιο Δημιουργίας Αγώγιμης Διαδρομής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διοχέτευση αυτών των φορτίων. Συνήθως παρατηρείται η διαδοχική δημιουργία ενός ή και περισσότερων νέων Βηματικών

Οχετών που κινούνται στην ίδια διαδρομή που χάραξε ο Κεντρικός Οχετός και με την ίδια φορά και οι οποίοι καλούνται (*Διαδοχικοί*) ***Ακόλουθοι Οχετοί***. Κάθε ένας από αυτούς κινείται με άλματα, όπως και οι Βηματικοί Οχετοί αλλά με μεγαλύτερη ταχύτητα σε σχέση με αυτούς και χωρίς να δημιουργεί διακλαδώσεις καθώς υπάρχει ήδη η αγώγιμη διαδρομή και δεν απαιτείται διάσπαση του διακένου (μπορεί σπανίως να δημιουργήσουν μικρές διακλαδώσεις υπό την επίδραση έντονων τοπικών πεδίων).

Κάθε φορά που ένας Ακόλουθος Οχετός φτάνει στην περιοχή με υψηλή πυκνότητα συγκέντρωσης αντίθετων φορτίων από αυτά που φέρει επαναλαμβάνεται η διαδικασία όπως μετά τη δημιουργία της αγώγιμης διαδρομής (Στάδιο 4ο). Δηλαδή προκαλείται ηλεκτρική εκκένωση, που καλείται ***Ακόλουθο Πλήγμα Επιστροφής*** (Κεραυνικά Πλήγματα) με μεταφορά φορτίων (από το νέφος προς το έδαφος) και προκαλείται λάμψη. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία για τον πρώτο Ακόλουθο Οχετό που δημιουργήθηκε μετά την Κεντρικό Οχετό, η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί διαδοχικά για έναν δεύτερο ή και πολλούς περισσότερους. Σπανίως παρατηρούνται περισσότεροι από είκοσι διαδοχικοί Ακόλουθοι Οχετοί με αντίστοιχα κεραυνικά πλήγματα. Το πλήθος τους εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα φορτίων στη θέση δημιουργίας του Κεντρικού Οχετού (το νέφος) και από τη δυναμική διαμόρφωση των πεδίων.



Σχήμα 1-6 Στάδια Εξέλιξης Κεραυνικού Φαινομένου – 6ο Στάδιο

Οι λάμψεις των Ακόλουθων Οχετών που εκδηλώνονται ως διαδοχικά Ακόλουθα Πλήγματα Επιστροφής συνήθως έχουν μικρότερη ένταση σε σχέση με αυτά του Κεντρικού Οχετού και εξασθενούν με την αύξηση του πλήθους των Ακόλουθων Οχετών. Οι λάμψεις αυτές δεν είναι εύκολα παρατηρήσιμες με γυμνό μάτι καθώς έχει προηγηθεί η υψηλής έντασης λάμψη του Κεντρικού Οχετού και η φορά κίνησής του έχει τη φορά του ρεύματος του πλήγματος (από το έδαφος προς το νέφος).

1.4 Κατηγορίες Κεραυνών

1.4.1 Κεραυνοί μεταξύ νεφών και κεραυνοί εντός νέφους

Στο (Rubiano-Cruz, et al., 2021) παρουσιάζονται οι δύο εξής κατηγορίες κεραυνών:

(α) Κεραυνοί μεταξύ νεφών (cloud to cloud) , δηλαδή ηλεκτρικές εκκενώσεις ανάμεσα σε διαφορετικά σύννεφα.

(β) Κεραυνοί εντός του νέφους (intracloud), δηλαδή ηλεκτρικές εκκενώσεις μέσα στο ίδιο σύννεφο.

1.4.2 Κεραυνοί μεταξύ νέφους και εδάφους

Οι Κεραυνοί μεταξύ νέφους και εδάφους μπορούν να διακριθούν σε τέσσερεις βασικές κατηγορίες (CIGRE Working Group 33.01, 1991) (Πυργιώτη, 2022) (Rubiano-Cruz, et al., 2021) (Heidler, et al., 2008) (Rakov & Uman, 2003) (Kim, et al., 2022) (Berger, et al., 1975) με κριτήρια: α) το φορτίο που φέρει η Οχετός (θετικός ή αρνητικός) ο οποίος και εν τέλει θα προκαλέσει το κεραυνικό πλήγμα και β) την πορεία που θα ακολουθήσει, δηλαδή κατερχόμενος από το νέφος προς το έδαφος ή αντίστροφα, ανερχόμενος από το έδαφος προς το νέφος. Η πολικότητα του πεδίου εξαρτάται από τα φορτία που από τις καιρικές συνθήκες έχουν διαμορφωθεί ανάμεσα στο νέφος και στο έδαφος.

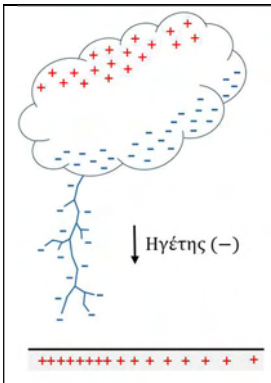
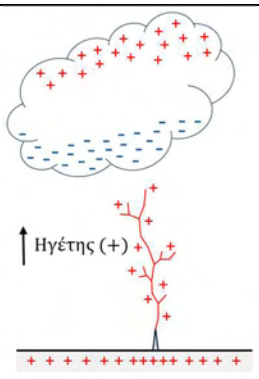
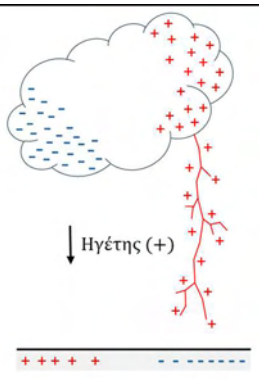
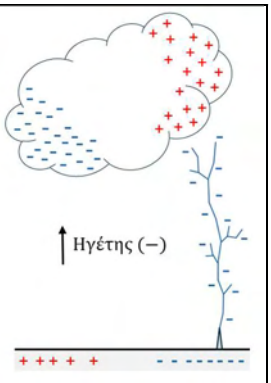
Σύμφωνα με αυτά οι Κεραυνοί μεταξύ νέφους και εδάφους, με κριτήριο το φορτίο και την πορεία του Οχετού που τους δημιουργεί, κατατάσσονται σε:

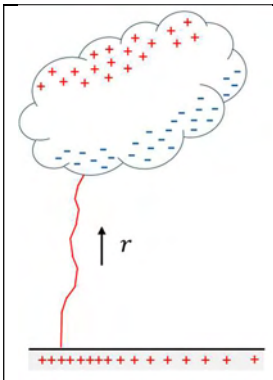
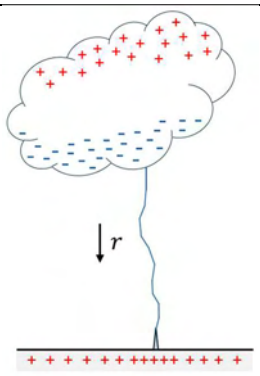
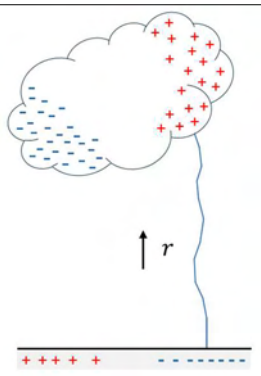
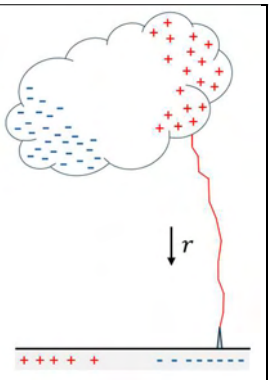
(α) ***Κατερχόμενος Αρνητικός*** *Οχετός* (Downward Negative): Αρνητικά φορτισμένος Οχετός διασπά το διάκενο και κατέρχεται από την αρνητικά φορτισμένη περιοχή του νέφους (κοντά στη βάση του) προς το θετικά φορτισμένο έδαφος.

(β) ***Ανερχόμενος Θετικός*** *Οχετός* (Upward Positive): Θετικά φορτισμένος Οχετός διασπά το διάκενο και ανέρχεται από μια θετικά φορτισμένη προεξοχή του εδάφους προς την αρνητικά φορτισμένη περιοχή του νέφους (κοντά στην βάση του).

(γ) ***Κατερχόμενος Θετικός*** *Οχετός* (Downward Positive): Θετικά φορτισμένος Οχετός διασπά το διάκενο και κατέρχεται από τη θετικά φορτισμένη περιοχή του νέφους (κοντά στην κορυφή του) προς το αρνητικά φορτισμένο έδαφος.

(δ) ***Ανερχόμενος Αρνητικός*** *Οχετός* (Upward Negative): Αρνητικά φορτισμένος Οχετός διασπά το διάκενο και ανέρχεται από μια αρνητικά φορτισμένη προεξοχή του εδάφους προς τη θετικά φορτισμένη περιοχή του νέφους (κοντά στην κορυφή του).

			
(1α) Κατ. Αρν. Οχετός	(1β) Ανερχ. Θετ. Οχετός	(1γ) Κατ. Θετ. Οχετός	(1δ) Ανερχ. Αρν. Οχετός

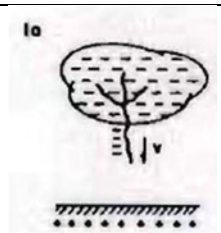
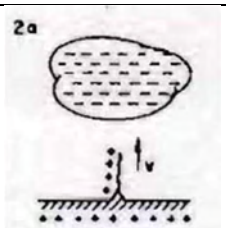
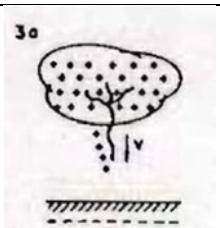
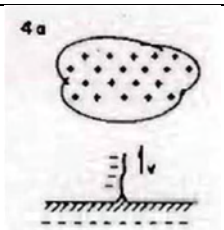
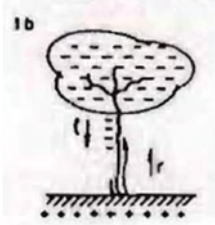
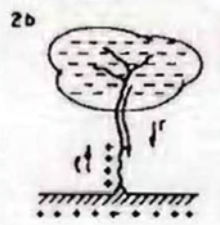
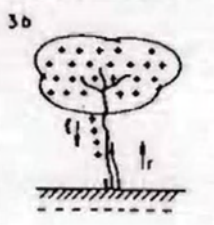
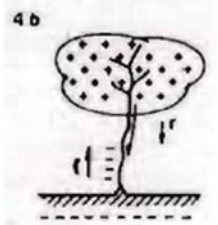
			
(2α) Πλήγμα Επιστροφής	(2β) Πλήγμα Επιστροφής	(2γ) Πλήγμα Επιστροφής	(2δ) Πλήγμα Επιστροφής

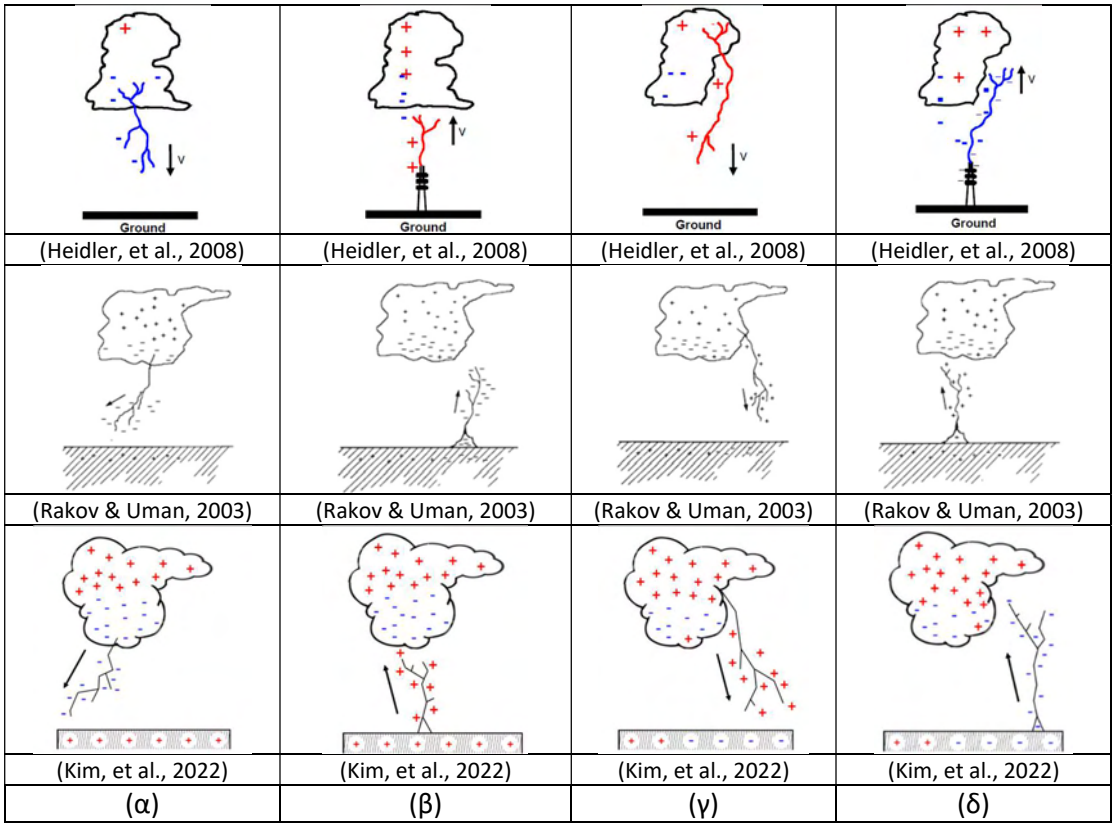
Σχήμα 1-7 Κατηγορίες Κεραυνών μεταξύ νέφους και εδάφους: (1α) Κατ. Αρν. Οχετός, (1β) Ανερχ. Θετ. Οχετός, (1γ) Κατ. Θετ. Οχετός, (1δ) Ανερχ. Θετ. Οχετός, (2α)-(2δ) πλήγματα επιστροφής, μετά από προσαρμογή (Anderson & Eriksson. , 1980) (Berger, 1978) (Heidler, et al., 2008) (Rakov & Uman, 2003) (Kim, et al., 2022)

Οι Αρνητικοί Οχετοί (Ανερχόμενοι ή Κατερχόμενοι) των κατηγοριών (α) και (δ) αναπτύσσουν βηματική κίνηση, δηλαδή κίνηση με άλματα της τάξης μερικών έως μερικών δεκάδων μέτρων με μέση ταχύτητα περίπου 0.24 m/μs, ενώ οι Θετικοί Οχετοί (Ανερχόμενοι ή Κατερχόμενοι) των κατηγοριών (β) και (γ) συνήθως δεν εμφανίζουν βηματική κίνηση (Πυργιώτη, 2022).

Από το σύνολο των Κεραυνών μεταξύ νέφους και εδάφους, το 90% περίπου είναι Κατερχόμενοι Αρνητικοί (α), το 10% περίπου είναι Κατερχόμενοι Θετικοί (γ) ενώ οι δύο κατηγορίες Ανερχόμενων εμφανίζονται εξαιρετικά σπάνια (Anon., 2010).

Οι Κατερχόμενοι (Αρνητικοί ή Θετικοί) παρατηρούνται συνήθως σε σχετικά επίπεδο έδαφος και πλήττουν μικρές προεξοχές και κατασκευές ύψους έως μερικές δεκάδες μέτρα. Οι Ανερχόμενοι παρατηρούνται συνήθως σε προεξοχές και κατασκευές ύψους άνω των 60 m (Heidler & Cvetic, 2002).

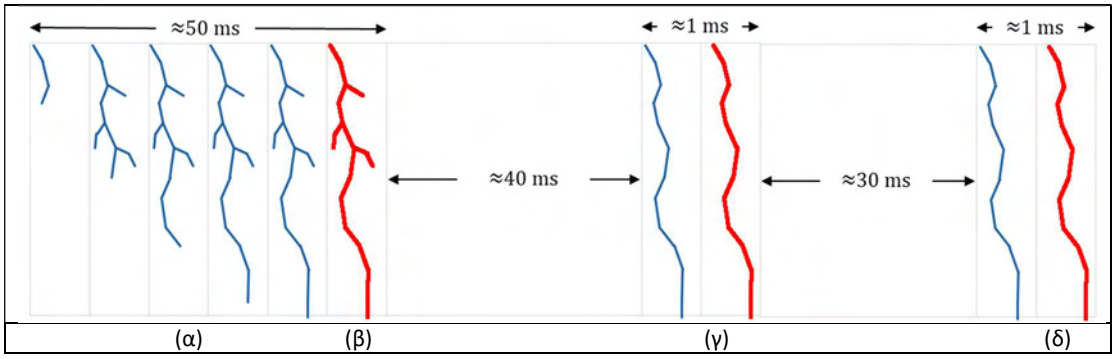
			
(Anderson & Eriksson. , 1980) (Berger, 1978) (Berger, June 1967)	(Anderson & Eriksson. , 1980) (Berger, 1978) (Berger, June 1967)	(Anderson & Eriksson. , 1980) (Berger, 1978) (Berger, June 1967)	(Anderson & Eriksson. , 1980) (Berger, 1978) (Berger, June 1967)
			
(Anderson & Eriksson. , 1980) (Berger, 1978)	(Anderson & Eriksson. , 1980) (Berger, 1978)	(Anderson & Eriksson. , 1980) (Berger, 1978)	(Anderson & Eriksson. , 1980) (Berger, 1978)



Σχήμα 1-8 Κατηγορίες Κεραυνών μεταξύ νέφους και εδάφους από (Anderson & Eriksson. , 1980) (Berger, 1978) (Heidler, et al., 2008) (Rakov & Uman, 2003) (Kim, et al., 2022)

1.4.3 Χρονική Εξέλιξη Σταδίων και Ακόλουθα Πλήγματα

Η χρονική εξέλιξη των σταδίων μπορεί να διαφέρει κατά τις διάφορες εκδηλώσεις του φαινομένου και ανάλογα με τον τύπο του πλήγματος. Στο Σχήμα 1-9 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη ενός Κατερχόμενου Αρνητικού κεραυνικού πλήγματος με ένα Πρώτο Πλήγμα (Σχήμα 1-9 (β)) και δύο διαδοχικά Ακόλουθα Πλήγματα (Σχήμα 1-9 (γ) και (δ)).



Σχήμα 1-9 Χρονική Εξέλιξη Σταδίων (α) Στάδια 1-4, (β) Στάδιο 5: Πρώτο Πλήγμα, (γ) Στάδιο 6: 1ο Ακόλουθο Πλήγμα, (δ) Στάδιο 6: 2ο Ακόλουθο Πλήγμα, μετά από προσαρμογή (Gönen, 2014)

Γενικά, περίπου το 75% των Κατερχόμενων Αρνητικών Κεραυνών εμφανίζουν περίπου τρία Ακόλουθα Πλήγματα μετά το Πρώτο, ενώ οι Κατερχόμενοι Θετικοί σπανίως εμφανίζουν Ακόλουθα Πλήγματα (Heidler, et al., 2008).

1.5 Ρεύμα Κεραυνικών Πληγμάτων

1.5.1 Επιπτώσεις Ρεύματος Πληγμάτων και Σχετικές Παράμετροι Ρεύματος

Το ρεύμα αποτελεί τη βασικότερη παράμετρο που σχετίζεται με τις επιπτώσεις των κεραυνικών πληγμάτων στις γραμμές μεταφοράς. Ο Heidler (Heidler, et al., 2008) και το πρότυπο IEC 62305-1 (Anon., 2010) αναφέρουν τις ακόλουθες βασικές παραμέτρους που συσχετίζονται με το ρεύμα των κεραυνικών πληγμάτων και τις επιπτώσεις τους (Σταθόπουλος, 1989):

Ρεύμα Κορυφής: I_{max}

Το Ρεύμα Κορυφής (I_{max}) ως αποτέλεσμα της αύξησης του δυναμικού του σημείου από το οποίο διαρρέει, συσχετίζεται με την υπερπήδηση των μονωτήρων και την απώλεια των μονωτικών τους ιδιοτήτων.

Φορτίο: $Q = \int i \cdot dt$

Το Φορτίο είναι άμεσα συσχετιζόμενο με φαινόμενα τήξης και διάτρησης μετάλλων.

Ειδική Ενέργεια: $W/R = \int i^2 \cdot dt$

Η Ειδική Ενέργεια συσχετίζεται με θερμικά φαινόμενα όπως τήξη μετάλλων, ανάφλεξη υλικών κλπ.

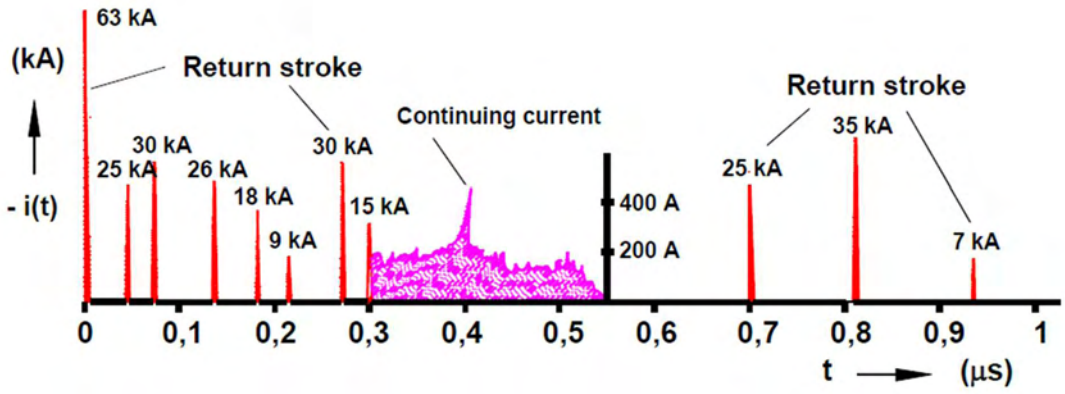
Μέγιστος Ρυθμός Ανόδου: $\left(\frac{di}{dt}\right)_{max}$

Ο Μέγιστος Ρυθμός Ανόδου του ρεύματος, δηλαδή η μέγιστη πρώτη παράγωγος του ρεύματος ως προς το χρόνο, καθορίζει τις επαγόμενες τάσεις στα δίκτυα μεταφοράς και σε άλλα κυκλώματα.

Από τις παραμέτρους αυτές γίνεται εμφανές ότι τα χαρακτηριστικά του ρεύματος των πληγμάτων είναι καθοριστικά για τις επιπτώσεις που αυτό επιφέρει.

1.5.2 Μορφή Ρευμάτων Πλήγματος

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορα παραδείγματα για τα ρεύματα κεραυνικών πληγμάτων. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα παρουσιάζεται στο (Heidler, et al., 2008) για έναν Κατερχόμενο Αρνητικό Κεραυνό (Σχήμα 1-10). Στο Σχήμα 1-10 αποτυπώνονται τα ρεύματα των κεραυνικών πληγμάτων, του Πρώτου και 10 Ακόλουθων Πληγμάτων (συνολικά 11). Το Πρώτο εμφανίζει υψηλή τιμή ρεύματος κορυφής (περίπου 63 kA) ενώ τα Ακόλουθα είναι μικρότερα της τάξης των 10 kA. Τα Ακόλουθα εμφανίζουν συντομότερους χρόνους ανόδου σε σχέση με το Πρώτο. Μετά το 8^{ο} πλήγμα παρατηρούνται συνεχιζόμενα ρεύματα (continuing currents) με πλάτη της τάξης των 100 A αλλά πολύ μεγαλύτερης διάρκειας της τάξης των 100 ms (Heidler, et al., 2008).



Σχήμα 1-10 Παράδειγμα ρευμάτων έντεκα διαδοχικών πληγμάτων, από το (Heidler, et al., 2008)

Στο πρότυπο IEC 62305-1 (Anon., 2010) γίνεται εκτενής αναφορά και δίνεται χρήσιμη ορολογία υποβοηθητική στην ανάλυση της μορφής των ρευμάτων κεραυνικού πλήγματος. Σύμφωνα με αυτό (Anon., 2010) οποιοδήποτε μεμονωμένο κεραυνικό πλήγμα, Πρώτο ή Ακόλουθο και ανεξάρτητα από τη κατηγορία στην οποία ανήκει (όπως στην παράγραφο 1.4.2) διακρίνεται στις κατηγορίες:

(α) Βραχύ Πλήγμα,

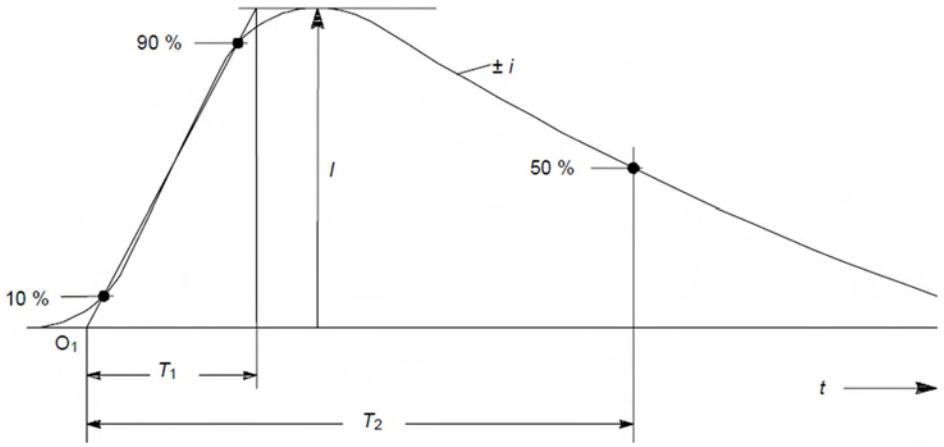
(β) Μακρύ Πλήγμα,

(γ) Μακρύ Πλήγμα με υπέρθεση βραχέων

Εκτενέστερη ανάλυση για το Βραχύ και το Μακρύ Πλήγμα γίνεται στις παραγράφους 1.5.3 και 1.5.4, αντίστοιχα. Για το Μακρύ Πλήγμα με υπέρθεση βραχέων μπορεί να συναχθεί η υπόθεση ότι προκύπτει με υπέρθεση των άλλων δύο.

1.5.3 Βραχύ Πλήγμα (Κρουστικό Πλήγμα)

Τα Βραχέα Πλήγματα σύμφωνα με τα (Anon., 2010) (Heidler, et al., 2008) εμφανίζουν ρεύματα που έχουν τη μορφή όπως στο Σχήμα 1-11. Μπορούν να προσεγγισθούν από κρουστικές συναρτήσεις (όπως στην παράγραφο 1.6).



Σχήμα 1-11 Ρεύμα Βραχέως Πλήγματος (Anon., 2010)

I: ***Ρεύμα κορυφής*** *(I_{max}).*

T_1: ***Διάρκεια Ανύψωσης Μετώπου (Χρόνος Μετώπου)*** (Front Time): Ο Χρόνος Μετώπου (T_1) ορίζεται ως μια χρονική παράμετρος με τιμή ίση με το γινόμενο του 1.25 επί το χρονικό διάστημα ανάμεσα στις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες το ρεύμα λαμβάνει το 10% και το 90% του ρεύματος κορυφής I_{max}. Και διαφορετικά, Ο Χρόνος Μετώπου (T_1) ορίζεται ως το χρονικό διάστημα ανάμεσα στις χρονικές στιγμές που καθορίζονται από τις τομές της ευθείας που ορίζουν τα σημεία που το ρεύμα λαμβάνει το 10% και το 90% του ρεύματος κορυφής I_{max}, με: (α) τον άξονα του χρόνου, (β) την παράλληλη στον άξονα του χρόνου στο σημείο I_{max}.

O_1: ***Συμβατική Έναρξη Πλήγματος*** (*Virtual Origin*). Η Έναρξη Πλήγματος (O_1) ορίζεται ως το χρονικό σημείο που ορίζουν η τομή του άξονα του χρόνου και της ευθείας που ορίζουν τα σημεία που το ρεύμα λαμβάνει το 10% και το 90% του ρεύματος κορυφής I_{max}. Το O_1 προηγείται χρονικά κατά $0.1 \cdot T_1$ του χρονικού σημείου κατά το οποίο το ρεύμα λαμβάνει την τιμή του 10% του ρεύματος κορυφής I_{max}.

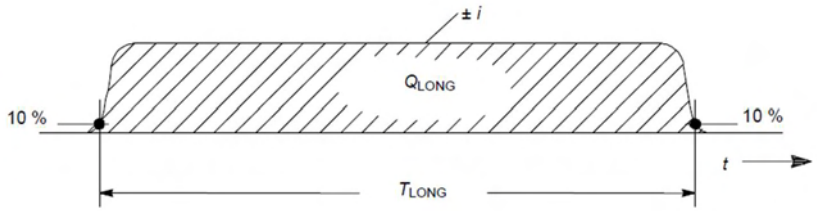
T_2: ***Χρόνος Ημίσεως Απόσβεσης (Διάρκεια Πτώσης στη Μισή Τιμή)*** (Time to Half Value): Ο Χρόνος *Ημίσεως Απόσβεσης* (T_2) ορίζεται ως μια χρονική παράμετρος με τιμή ίση με το χρονικό διάστημα ανάμεσα στην Έναρξη Πλήγματος (O_1) και τη χρονική στιγμή κατά την οποία το ρεύμα λαμβάνει πτωτικά την τιμή του 50% του ρεύματος κορυφής I_{max}.

Q_{SHORT}: ***Φορτίο Βραχέως Πλήγματος***: Το Φορτίο Βραχέως Πλήγματος (Q_{SHORT}) ορίζεται ως το ολοκλήρωμα ως προς το χρόνο του πλήγματος του ρεύματος του βραχέως πλήγματος.

Το Βραχέα Πλήγματα εμφανίζουν κατά κανόνα Χρόνους Ημίσεως Απόσβεσης (T_2) μικρότερες των 2 ms.

1.5.4 Μακρύ Πλήγμα (Συνεχές Πλήγμα)

Τα Μακρά Πλήγματα σύμφωνα με το (Anon., 2010) εμφανίζουν ρεύματα που έχουν τη μορφή όπως στο Σχήμα 1-12. Το ρεύμα αντιστοιχεί σε ένα συνεχιζόμενο - όχι συνεχές – (continuing current), ρεύμα.



Σχήμα 1-12 Ρεύμα Μακρού Πλήγματος (Anon., 2010)

$I_{\mathrm{L},max}$: ***Μέγιστο Ρεύμα Μακρού Μετώπου***

T_{LONG}: ***Χρόνος Μακρού Μετώπου*** (Front Time): Ο Χρόνος Μακρού Μετώπου (T_{LONG}) ορίζεται ως μια χρονική παράμετρος με τιμή ίση με το χρονικό διάστημα ανάμεσα στις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες το ρεύμα λαμβάνει το 10% ανοδικά και το 10% πτωτικά, του μεγίστου ρεύματος $I_{\mathrm{L},max}$.

Q_{LONG}: ***Φορτίο Μακρού Πλήγματος*** (Long Stroke Charge): Το Φορτίο Μακρού Πλήγματος (Q_{LONG}) ορίζεται ως το ολοκλήρωμα ως προς το χρόνο για διάστημα T_{LONG} του ρεύματος του μακρού πλήγματος.

Το Μακρά Πλήγματα εμφανίζουν κατά κανόνα Χρόνους Μακρού Μετώπου (T_{LONG}) από 2 ms έως 1 s. Αν και όπως φαίνεται από τα δεδομένα μετρήσεων οι τιμές των ρευμάτων $I_{\mathrm{L},max}$ στα Μακρά Πλήγματα είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με αυτές των I_{max} των Βραχέων Πληγμάτων (Heidler, et al., 2008) τα φορτία που μεταφέρονται είναι μεγάλα λόγω των μεγάλων τιμών που λαμβάνουν τα T_{LONG}.

1.6 Μαθηματική έκφραση Βραχέως Πλήγματος

Η μαθηματική έκφραση του ρεύματος πλήγματος επιστροφής μπορεί να αποτυπωθεί με δύο βασικές μεθόδους: (α) προσσέγγιση μέσω διπλοεκθετικής συνάρτησης, (β) εξίσωση Heidler.

1.6.1 Διπλοεκθετική Συνάρτηση

Το ρεύμα του κεραυνικού πλήγματος μπορεί να προσεγγισθεί από κρουστική συνάρτηση στη μορφή Διπλοεκθετικής Συνάρτησης (Πυργιώτη, 2019) (Heidler, et al., 2008) (Heidler & Cvetic, 2002) που δίνεται από τη σχέση:

$$i_e(t) = \frac{I_{max}}{\eta_e}\left(\mathrm{e}^{-t/T_1} - \mathrm{e}^{-t/T_2}\right) \qquad (1)$$

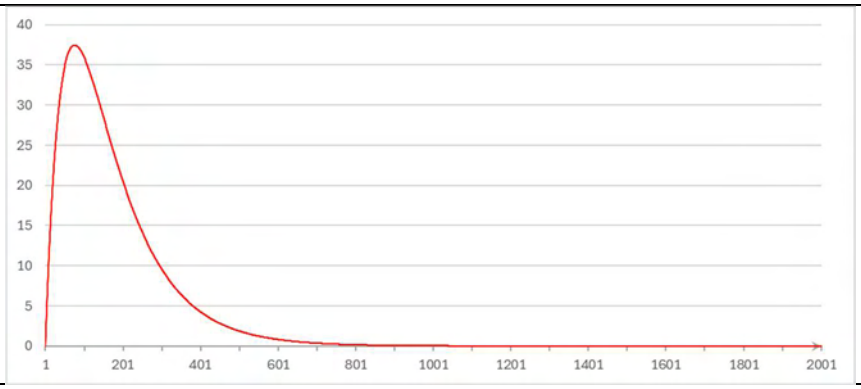
Όπου:

- I_{max}: το ρεύμα κορυφής (A)
- η_e: συντελεστής διόρθωσης του ρεύματος κορυφής
- T_1: Χρόνος Μετώπου (s)
- T_2: Χρόνος Ημίσεως Απόσβεσης (s)

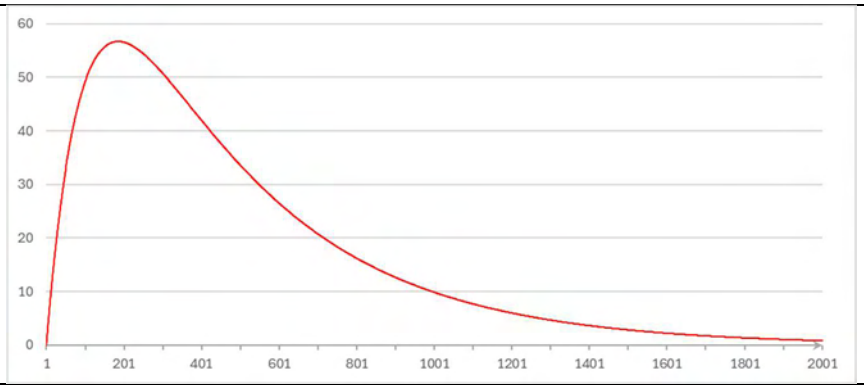
Ο συντελεστής διόρθωσης ρεύματος κορυφής η_e δίνεται (Heidler & Cvetic, 2002) από τη σχέση:

$$\eta_e = \frac{T_1}{T_2}\left(e^{-\frac{T_2}{T_1-T_2}} - e^{-\frac{T_1}{T_1-T_2}}\right) \qquad (2)$$

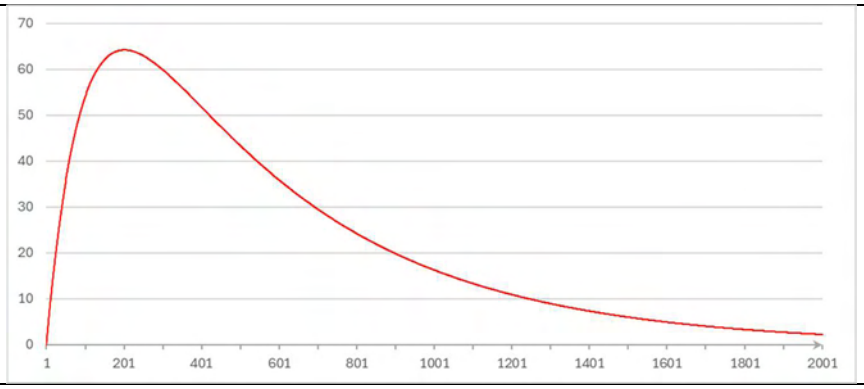
Κάνοντας χρήση της (1) μπορούν να παραχθούν διάφορες μορφές που μπορεί να λάβει η μεταβολή του ρεύματος για Βραχέα Πλήγματα (Σχήμα 1-13).



(α) $T_1 = 50\ \mu\mathrm{s}$, $T_2 = 120\ \mu\mathrm{s}$



(β) $T_1 = 100\ \mu s$, $T_2 = 400\ \mu s$



(γ) $T_1 = 100\ \mu s$, $T_2 = 500\ \mu s$

Σχήμα 1-13 Διπλοεκθετική Συνάρτηση - Απεικόνιση ρευμάτων Βραχέων Πληγμάτων για διάφορες τιμές Χρόνου Μετώπου και Χρόνου Ημίσεως απόσβεσης (δημιουργήθηκε με excel).

Από τα αποτελέσματα όπως στο Σχήμα 1-13 γίνεται εμφανής η χρησιμότητα του συντελεστή διόρθωσης μέγιστου ρεύματος η_e, καθώς ενώ όλες οι καμπύλες έχουν παραχθεί για $I_{max} = 120\ \text{kA}$, η μέγιστη τιμή που λαμβάνει το ρεύμα είναι περίπου 38 kA στην περίπτωση (α), ενώ στις περιπτώσεις (β) και (γ) προσεγγίζει τα 60 kA και 64 kA, αντίστοιχα.

Όμως η Διπλοεκθετική Συνάρτηση δεν είναι πλήρως ικανοποιητική για την προσέγγιση Βραχέων Πληγμάτων καθώς στην αρχή του άξονα του χρόνου εμφανίζει απότομες αυξήσεις των τιμών του ρεύματος (Heidler & Cvetic, 2002) (Heidler, et al., 2008), ενώ το πρότυπο απαιτεί προοδευτική αύξηση με αρχικά χαμηλές τιμές ρεύματος (Anon., 2010) (όπως στο Σχήμα 3-10).

1.6.2 Συνάρτηση Heidler

Όπως προτάθηκε στο (Heidler & Cvetic, 2002) (Heidler, et al., 2008) και υιοθετήθηκε από το (Anon., 2010), για να προσεγγισθεί το ρεύμα Βραχέων Πληγμάτων χρησιμοποιείται η εξίσωση (3) γνωστή και ως συνάρτηση Heidler:

$$i_h(t) = \frac{I_{max}}{\eta_h} \frac{\left(\frac{t}{T_1}\right)^{n_h}}{1 + \left(\frac{t}{T_1}\right)^{n_h}} \mathrm{e}^{-t/T_2} \qquad (3)$$

Όπου:

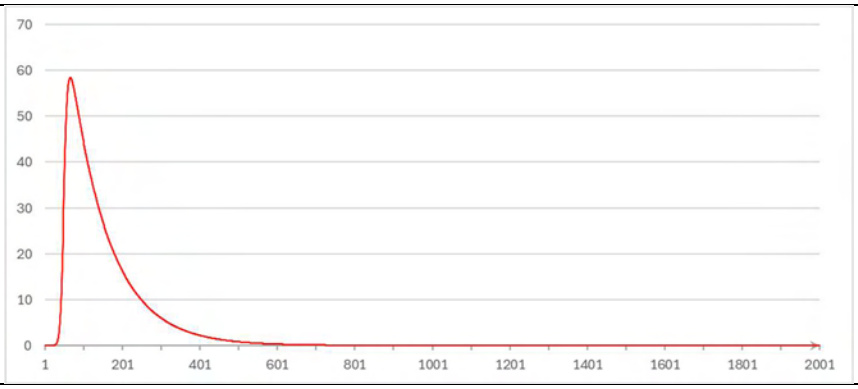
- I_{max}: το ρεύμα κορυφής (A)

- η_h: συντελεστής διόρθωσης του ρεύματος κορυφής
- T_1: Χρόνος Μετώπου (s)
- T_2: Χρόνος Ημίσεως Απόσβεσης (s)
- n_h: Συντελεστής κλιμάκωσης Heilder

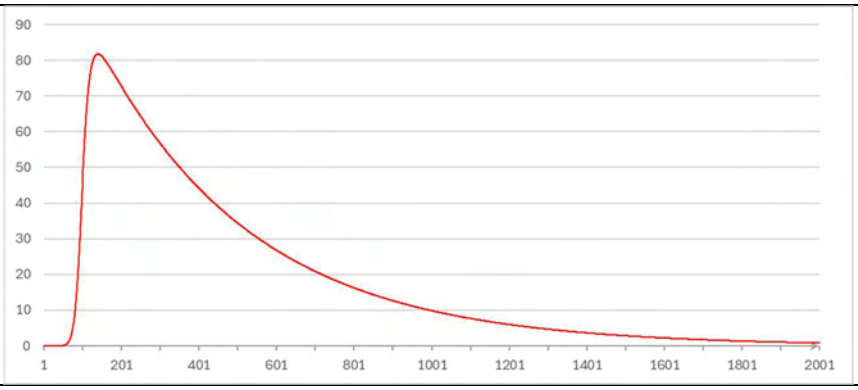
Ο συντελεστής διόρθωσης ρεύματος κορυφής η_h δίνεται από τη σχέση (Vujević & Lovrić, 2010) (Terespolsky, et al., 2024):

$$\eta_h = e^{\left(-\frac{T_1}{T_2}\left(\frac{n_h T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{n_h}}\right)} \quad (4)$$

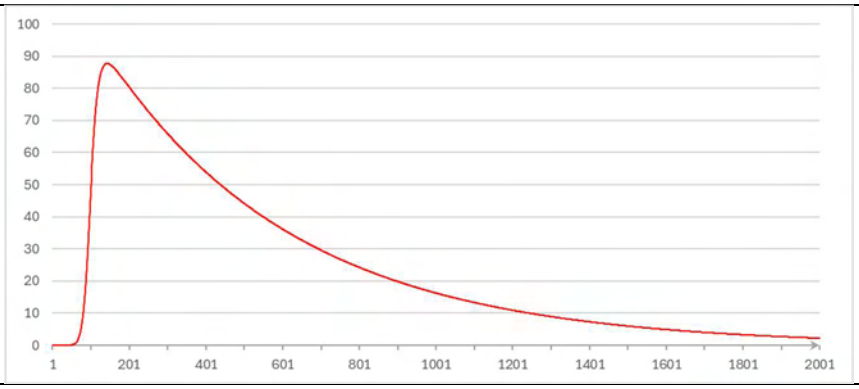
Η (3) προσεγγίζει καλύτερα τη μορφή των ρευμάτων Βραχέων Πληγμάτων (Anon., 2010) (Terespolsky, 2015) (Heidler, et al., 2008) (Heidler & Cvetic, 2002). Μάλιστα το πρότυπο IEC 62305-1 (Anon., 2010) έχει υιοθετήσει την εξίσωση Heidler για $n_h = 10$. Κάνοντας χρήση της (3) μπορούν να παραχθούν διάφορες μορφές που μπορεί να λάβει η μεταβολή του ρεύματος για Βραχέα Πλήγματα (Σχήμα 1-14).



(α) $T_1 = 50\ \mu s$, $T_2 = 120\ \mu s$



(β) $T_1 = 100\ \mu s$, $T_2 = 400\ \mu s$



(γ) $T_1 = 100\ \mu s$, $T_2 = 500\ \mu s$

Σχήμα 1-14 Εξίσωση Heidler - Απεικόνιση ρευμάτων Βραχέων Πληγμάτων για διάφορες τιμές Διάρκειας Μετώπου και Διάρκειας Ημίσεως απόσβεσης, για συνολικό χρόνο πλήγματος 2 ms (δημιουργήθηκε με excel).

1.7 Μέγιστες τιμές παραμέτρων ρεύματος στο πρότυπο IEC 62305-1

Στο (Anon., 2010) ορίζονται οι μέγιστες τιμές των παραμέτρων των σχετικών με το ρεύμα του πλήγματος (όπως στην παράγραφο 1.5.1) για τα τέσσερα Επίπεδα Κεραυνικής Προστασίας (Lightning Protection Levels) διαβαθμισμένα από το πρώτο έως το τέταρτο. Στο πρώτο επίπεδο LPL-I, ορίζονται οι μέγιστες τιμές των σχετιζόμενων με το ρεύμα πλήγματος παραμέτρων, δηλαδή του Ρεύματος Κορυφής (I_{max}), του Φορτίου (Q), της Ειδικής Ενέργειας (W/R) και της Μέγιστης Κλιμάκωσης Ρεύματος ($max\left(\frac{d_i}{d_t}\right)$).

Σύμφωνα με το (Anon., 2010) η πιθανότητα εκδήλωσης μεγαλύτερων τιμών από τις μέγιστες τιμές είναι 1% (πιθανότητα μη εκδήλωσης 99%). Στα υπόλοιπα τρία επίπεδα, LPL-II, LPL-III και LPL-IV η μέγιστη τιμή του Ρεύματος Κορυφής (I_{max}) που ορίσθηκε για το LPL-I, μειώνεται στο 75% για το LPL-II και κατά 50% για τα LPL-III και LPL-IV με κατάλληλες μεταβολές κατά τους ορισμούς τους (παράγραφος 1.5.1) στις υπόλοιπες παραμέτρους (Anon., 2010).

Πίνακας 1-1 Μέγιστες τιμές παραμέτρων ρεύματος ανά Επίπεδο Κεραυνικής Προστασίας, μετά από προσαρμογή από το (Anon., 2010).

Παράμετροι Ρεύματος Πλήγματος				**Επίπεδα Κεραυνικής Προστασίας (LPL)**			
Βραχέα Πλήγματα				**I**	**II**	**III**	**IV**
Πρώτο Θετικό (+) Πλήγμα	Ρεύμα Κορυφής	I_{max}	(kA)	200	150	100	
	Φορτίο	Q_{SHORT}	(C)	100	75	50	
	Ειδική Ενέργεια	W/R	(MJ/Ω)	10	5.6	2.5	
	Χρόνοι	T_1/T_2	(μs/μs)	10/350			
Πρώτο Αρνητικό (-) Πλήγμα	Ρεύμα Κορυφής	I_{max}	(kA)	100	75	50	
	Μέγιστη Κλιμάκωση	di/dt_{max}	(kA/μs)	100	75	50	
	Χρόνοι	T_1/T_2	(μs/μs)	1/200			
Ακόλουθα Πλήγματα	Ρεύμα Κορυφής	I_{max}	(kA)	50	37.5	25	
	Μέγιστη Κλιμάκωση	di/dt_{max}	(kA/μs)	200	150	100	
	Χρόνοι	T_1/T_2	(μs/μs)	0.25/100			

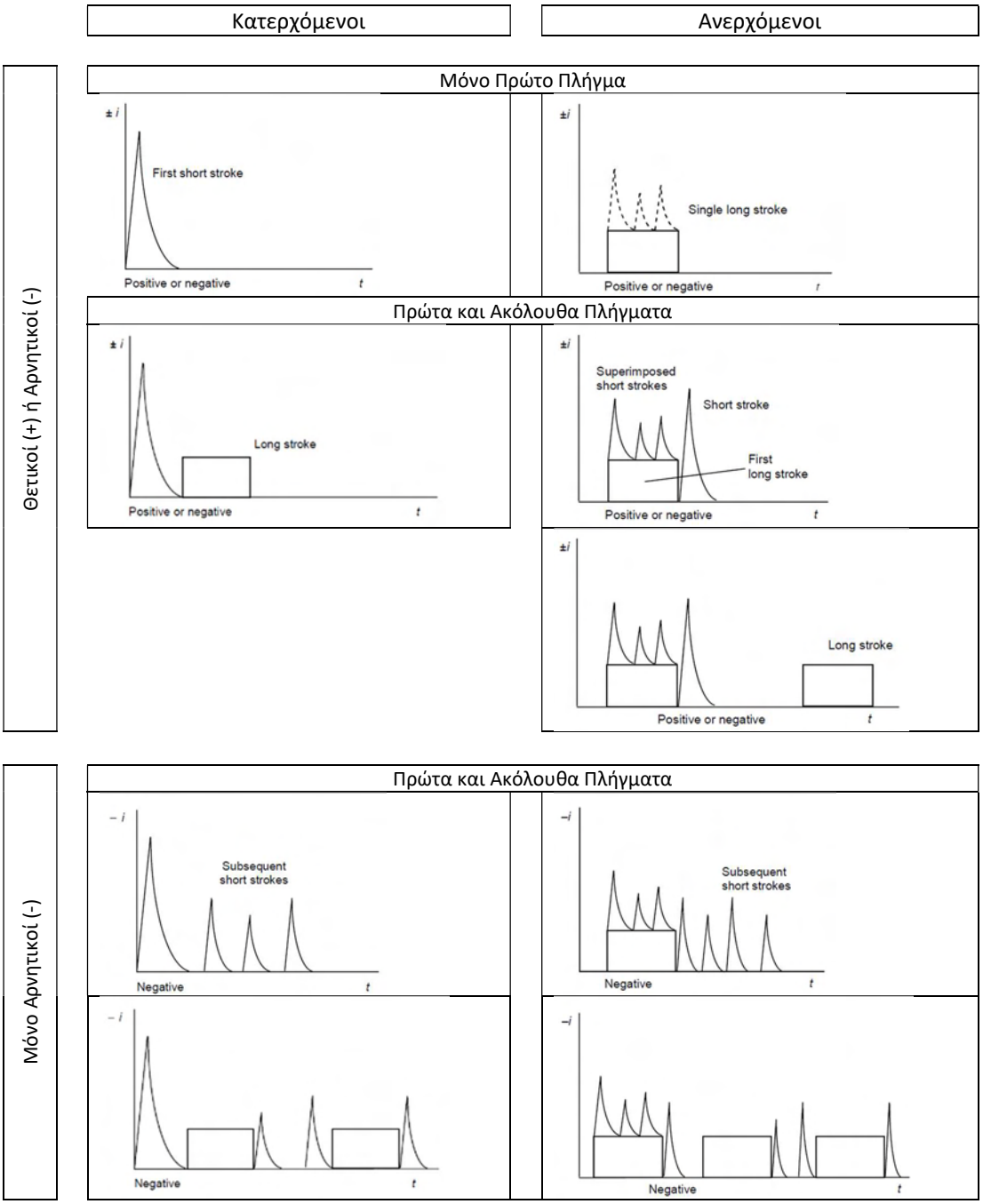
Μακρά Πλήγματα				**I**	**II**	**III**	**IV**
	Φορτίο	Q_{LONG}	(C)	200	150	100	
	Χρόνοι	T_{LONG}	(s)	0.5			

Το πρότυπο ορίζει τις μέγιστες τιμές βασιζόμενο στα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία για κάθε μία από τις κατηγορίες πληγμάτων, λαμβάνοντας για το Επίπεδο Προστασίας I (LPL-I) τις τιμές ρεύματος κορυφής I_{max} με πιθανότητα 1% και κάνοντας υπολογισμούς για τα υπόλοιπα μεγέθη (Anon., 2010). Βάσει αυτών των ρευμάτων κορυφής I_{max} και βασιζόμενο και πάλι στα διαθέσιμα στατιστικά δεδομένα δίνει τους Χρόνους T_1/T_2 για κάθε μια κατηγορία πληγμάτων π.χ. $T_1/T_2 = 1\ \mu s/200\ \mu s$ της συνάρτησης Heidler με $\eta_h = 10$, για τα Βραχέα Πρώτα Αρνητικά.

1.8 Στατιστικά Δεδομένα για τα Κεραυνικά Πλήγματα

1.8.1 Πιθανές Ακολουθίες Πρώτων και Ακόλουθων Πληγμάτων

Στο (Anon., 2010) αναφέρονται οι πιθανές ακολουθίες Πρώτων και Ακόλουθων πληγμάτων (Σχήμα 1-15).



Σχήμα 1-15: Πιθανές Ακολουθίες Πρώτων / Ακόλουθων Πληγμάτων, μετά από προσαρμογή από το (Anon., 2010).

Η πιθανότητα εμφάνισης Μόνο Πρώτου Πλήγματος έχει μέση τιμή 45%. Η πιθανότητα εμφάνισης και Ακόλουθων Πληγμάτων είναι περίπου 55%, ενώ αναμένονται 2 έως 3 Ακόλουθα Πλήγματα μετά το Πρώτο. Η πιθανότητα εμφάνισης περισσότερων από 9

Ακόλουθων Πληγμάτων είναι μικρότερη του 5%. Γενικά σε κάθε εκδήλωση του φαινομένου αναμένονται συνολικά 3 κεραυνικά πλήγματα, δηλαδή 1 Πρώτο και 2 Ακόλουθα (Anderson & Eriksson. , 1980). Τα Μακρά με ή χωρίς υπέρθεση Βραχέων έχουν πιθανότητα εμφάνισης περίπου 10%.

1.8.2 Χρόνοι

Οι Πρώτοι Αρνητικοί εμφανίζουν Μέσο Χρόνο Μετώπου $T_{Front(1:-),\mu} \approx 5$ μs ενώ η ουρά τους έχει μέση διάρκεια $T_{Tail(1:-),\mu} \approx 70$ μs. Οι Ακόλουθοι Αρνητικοί εμφανίζουν Μέσο Χρόνο Μετώπου $T_{Front(x:-),\mu} \approx 1.1$ μs ενώ η ουρά τους έχει μέσο Χρόνο $T_{Tail(x:-),\mu} \approx 30$ μs.

Τα χρονικά διαστήματα ανάμεσα στα κεραυνικά πλήγματα εμφανίζουν μέση τιμή $T_{d,\mu} \approx 35$ ms (6 ms με πιθανότητα 95% και 200 ms με πιθανότητα 5%).

Οι περισσότεροι Θετικοί εμφανίζουν διάρκειες πλήγματος από 100 μs έως 1000 μs.

Για το 95% των κεραυνών, η τυπική συνολική τους διάρκεια (T_{Total}) κυμαίνεται από περίπου 80 μs (για αυτούς με μόνο Πρώτο Πλήγμα) έως και 550 ms (για κάποιους με 10 διαδοχικά πλήγματα).

1.8.3 Μέγιστα Ρεύματα και Ρυθμοί Ανόδου

Δεν έχει βρεθεί κάποια συστηματική συσχέτιση ανάμεσα στο μέγιστο ρεύμα (I_{max}) του Πρώτου και των Ακόλουθων. Συνήθως οι Ακόλουθοι κεραυνοί εμφανίζουν μέγιστα ρεύματα κοντά στο 40 – 50 % του Πρώτου. Όμως εμφανίζουν Ρυθμούς Ανόδου (di/dt) 2 έως 3 φορές μεγαλύτερους από τους Πρώτους τους. Στους Κατερχόμενους Αρνητικούς η μέση τιμή του μέγιστου ρεύματος ($I_{max.\mu}$) είναι 34 kA (4 kA με πιθανότητα 98%, 20 kA με πιθανότητα 80% και 90 kA με πιθανότητα 5%) (Anderson & Eriksson. , 1980).

Οι περισσότεροι Θετικοί εμφανίζουν μόνο Πρώτα Πλήγματα με ισχυρά ρεύματα κορυφής, περίπου 2 έως 5 φορές μεγαλύτερα από τους Αρνητικούς και με μεγαλύτερες διάρκειες ουράς.

Όλες, αυτές οι εκτιμήσεις μπορεί να διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή, τις κατά τόπους καιρικές συνθήκες που διαμορφώνονται δυναμικά κατά την εξέλιξη του φαινομένου και τις διαμορφώσεις του εδάφους και των υπερκείμενων σε αυτό κατασκευών.

1.8.4 Πιθανές τιμές παραμέτρων ρεύματος πλήγματος

Στο (Anon., 2010) αναφέρονται οι εκτιμήσεις για τις τιμές του ρεύματος κορυφής συνοδευόμενες από τις πιθανότητες εμφάνισής τους και τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων που συσχετίζονται με το ρεύμα κορυφής (Πίνακας 1-2). Στον πίνακα έχουν επιπλέον εισαχθεί οι χρόνοι T_1/T_2 κατά το πρότυπο IEC, για πρώτο επίπεδο κεραυνικής προστασίας (LPL-I).

Πίνακας 1-2 Στατιστικά στοιχεία τιμών παραμέτρων ρεύματος ανά κατηγορία πλήγματος, μετά από μετατροπή και προσαρμογή από το (Anon., 2010).

				LPL-I	**Μέση Τιμή**	**95%**	**50%**	**5%**
Βραχέα Πλήγματα								
Πρώτο Αρνητικό (-)	Ρεύμα Κορυφής	I_{max}	(kA)	100	33,4	4	20	90
	Φορτίο	Q	(C)		4,69	1,1	4,5	20
	Ειδική Ενέργεια	W/R	(kJ/Ω)		57,4	6	55	550
	Μέγιστη Κλιμάκωση	$di/dt_{\max}$	(kA/μs)	100	24,3	9,1	24,3	65
	Χρόνος Μετώπου	T_1	(μs)		5,69	1,8	5,5	18
	Συνολική Διάρκεια	T_{total}	(μs)		77,5	30	75	200
		T_1/T_2	(μs)/(μs)	1/200				
Ακόλουθα Αρνητικά (-)	Ρεύμα Κορυφής	I_{max}	(kA)	50	11,8	4,9	11,8	28,6
	Φορτίο	Q	(C)		0,938	0,22	0,95	4
	Ειδική Ενέργεια	W/R	(kJ/Ω)		5,35	0,55	6	52
	Μέγιστη Κλιμάκωση	$di/dt_{\max}$	(kA/μs)		40	9,9	39,9	161,5
	Ρυθμός Κλιμάκωσης 30%-90%	di/dt	(kA/μs)	200	20,1	4,1	20,1	98,5
	Χρόνος Μετώπου	T_1	(μs)		0,995	0,22	1,1	4,5
	Συνολική Διάρκεια	T_{total}	(μs)		30,2	6,5	32	140
		T_1/T_2	(μs)/(μs)	0.25/100				
Σ	Φορτίο	Q	(C)	300	83,7	20	80	350
	Συνολική Διάρκεια	T_{total}	(ms)		83,7	14	85	500
Μεσοδιάστημα Αρνητικών (-)		T_D	(ms)		32,4	7	33	150
Πρώτο Θετικό (+)	Ρεύμα Κορυφής	I_{max}	(kA)	200	33,9	4,6	35	250
	Φορτίο	Q	(C)	100	17,3	2	16	150
	Ειδική Ενέργεια	W/R	(kJ/Ω)	10000	612	25	650	15000
	Μέγιστη Κλιμάκωση	$di/dt_{\max}$	(kA/μs)	20	2,53	0,2	2,4	32
	Χρόνος Μετώπου	T_1	(μs)		26,5	3,5	22	200
	Συνολική Διάρκεια	T_{total}	(μs)		224	25	230	2000
		T_1/T_2	(μs)/(μs)	10/350				

Μακρά Πλήγματα

Φορτίο	Q	(C)	200	
Συνολική Διάρκεια	T_{total}	(s)	0,5	

2 Μονωτήρες

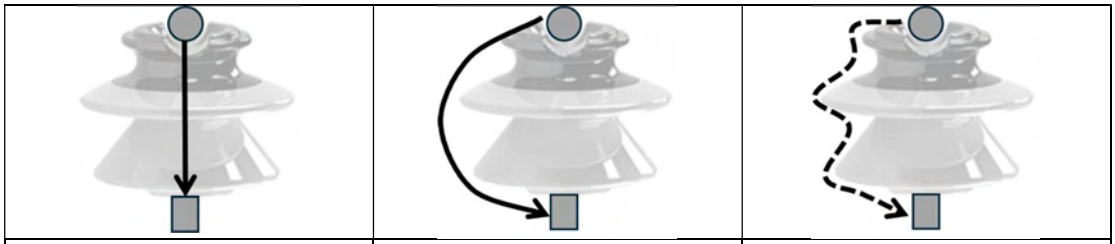
2.1 Γενικά

Στις εναέριες γραμμές μεταφοράς είναι απαραίτητη η ηλεκτρική μόνωση των αγωγών σε σχέση με τις υποκείμενες δομές (πυλώνες, στύλους) όσο και μεταξύ τους. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται στερεά σώματα (εξαρτήματα των δικτύων) που καλούνται μονωτήρες που διαχωρίζουν τους αγωγούς μεταξύ τους και τους απομονώνουν ηλεκτρικά από τις δομές που τους φέρουν. Εκτός της ηλεκτρικής μόνωσης οι μονωτήρες χρησιμοποιούνται και για την μηχανική στήριξη των αγωγών πάνω στους στύλους. Επομένως, υπάρχουν τουλάχιστον δύο κατηγορίες ιδιοτήτων των μονωτήρων που εμφανίζουν ενδιαφέρον στα δίκτυα Μέσης Τάσης (α) Ηλεκτρικές ιδιότητες (β) Μηχανικές ιδιότητες.

Οι μηχανικές ιδιότητες αφορούν κυρίως την ικανότητα των μονωτήρων να ικανοποιήσουν τις προδιαγραφές στήριξης και ανάρτησής των αγωγών πάνω στους πυλώνες και στύλους που τους φέρουν. Οι Μηχανικές ιδιότητες έχουν περιορισμένο ενδιαφέρον για την εργασία. Οι Ηλεκτρικές ιδιότητές τους παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον καθώς η ηλεκτρική συμπεριφορά των μονωτήρων επηρεάζει άμεσα και σε μεγάλο βαθμό τη λειτουργία του δικτύου, ειδικά υπό την εφαρμογή κρουστικών ρευμάτων ή τάσεων όπως αυτές που προκαλούνται από τα κεραυνικά πλήγματα.

2.2 Ηλεκτρική Διάσπαση μονωτήρων - Υπερπήδηση

Η ηλεκτρική απομόνωση που προσφέρουν οι μονωτήρες, δηλαδή η αποτροπή διέλευσης ρεύματος ανάμεσα στα υπό τάση άκρα τους, εξαρτάται από παράγοντες όπως το υλικό τους, η γεωμετρική διαμόρφωσή τους, ο τρόπος προσάρτησης του αγωγού στον μονωτήρα, ο τρόπος προσάρτησης του μονωτήρα στη δομή που τον στηρίζει, κ.α. Ως άκρα του μονωτήρα θεωρούνται τα σημεία του μονωτήρα στα οποία προσαρτάται ο αγωγός και η δομή στήριξης του ή γενικά στα αγώγιμα στοιχεία του.



Σχήμα 2-1 (α) Διάτρηση μονωτήρα, (β) Διάσπαση αέρα, (γ) Ρεύμα ερπυσμού

Απώλεια των μονωτικών ιδιοτήτων του μονωτήρα μπορεί να συμβεί λόγω των εξής φαινομένων:

2.2.1 Διάτρηση Μονωτήρα

Η Διάτρηση του μονωτήρα, δηλαδή διέλευση ρεύματος μέσα από το σώμα του υλικού του μονωτήρα, συμβαίνει όταν η διαφορά δυναμικού στα άκρα του υπερβεί την Τάση Διάσπασης του υλικού. Η διάτρηση συμβαίνει σπάνια καθώς οι μονωτήρες από τις προδιαγραφές τους έχουν πολύ υψηλότερες τάσεις διάσπασης υλικού από τις τάσεις που εφαρμόζονται στα άκρα τους (Σχήμα 4-1(α)).

2.2.2 Υπερπήδηση Μονωτήρα

Η Υπερπήδηση του μονωτήρα, δηλαδή η διέλευση ρεύματος ανάμεσα στα άκρα του, εκτός του σώματος του υλικού του μονωτήρα, μπορεί να συμβεί λόγω:

(α) της ανάπτυξης ρεύματος ερπυσμού πάνω και πολύ κοντά στην επιφάνεια του υλικού του μονωτήρα (Σχήμα 4-1 (γ)),

(β) της ανάπτυξης ρεύματος ηλεκτρικής εκκένωσης, δηλαδή τόξου, ανάμεσα στα άκρα του, λόγω ηλεκτρικής διάσπασης του αέρα που περιβάλλει τον μονωτήρα (Σχήμα 4-1 (β)).

Υπό την γενική έννοια και η διάτρηση μονωτήρα θεωρείται υπερπήδηση του μονωτήρα καθώς οδηγεί στη διέλευση ρεύματος ανάμεσα στα άκρα του ανεξάρτητα από το δρόμο που το ρεύμα ακολουθεί.

Για την αποφυγή της ανάπτυξης ρευμάτων ερπυσμού η γεωμετρία των μονωτήρων διαμορφώνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αυξάνεται το μήκος που πρέπει να διανύσει το ρεύμα ερπυσμού ανάμεσα στα άκρα του μονωτήρα. Για αυτό και οι μονωτήρες εμφανίζουν κυματοειδείς επιφανειακές διαμορφώσεις. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που μπορεί να διευκολύνουν την ανάπτυξη ρευμάτων ερπυσμού όπως: οι ατμοσφαιρικές συνθήκες (συνθήκες υψηλής υγρασία, αιωρούμενων σωματιδίων), η ύπαρξη ρύπων στην επιφάνεια του μονωτήρα, γήρανση του υλικού του, κ.α.

Η ανάπτυξη ρεύματος ηλεκτρικής εκκένωσης μέσω της διάσπασης του αέρα, είναι περίπλοκη διαδικασία και ομοιάζει με την διαδικασία ανάπτυξης κεραυνικών πληγμάτων.

Τα ρεύματα ερπυσμού συνήθως προηγούνται ή και αναπτύσσονται ταυτόχρονα με τη διάσπαση του αέρα περιβάλλοντος, που οδηγούν τελικά στην ηλεκτρική εκκένωση και στην Υπερπήδηση (flashover) του μονωτήρα.

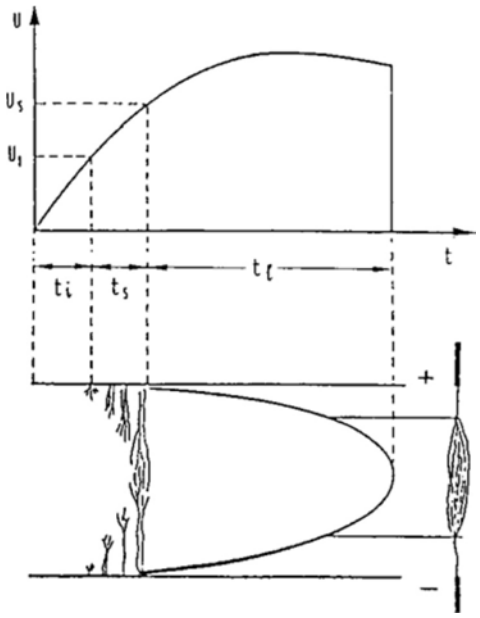
2.2.3 Διαδικασία Διάσπασης Αέρα

Η διαδικασία εξέλιξης της διάσπασης του αέρα ανάμεσα στα άκρα του μονωτήρα, διαμέσου του διάκενου του αέρα που τον περιβάλλει, μπορεί να προσεγγιστεί από τη γενική περιγραφή διάσπασης αέρα, ανεξάρτητα με το εάν συμβαίνει ανάμεσα σε δύο αγωγούς, δύο ηλεκτρόδια, ανάμεσα σε ένα ηλεκτρόδιο και μια επιφάνεια, ή στα άκρα ενός μονωτήρα.

Η διαδικασία διάσπασης αναπτύσσεται σε τρία στάδια (CIGRE Working Group 33.01, 1991) (Datsios, et al., 2011) (Mikropoulos, et al., 2023). Για κάθε ένα από αυτά έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα ονόματα σε μια προσπάθεια να περιγραφεί το φυσικό φαινόμενο. Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται τα ονόματα (α) Έναρξη Κορώνας, (β) Διάδοση Νηματίων και (γ) Διάδοση Οχετού σε μια προσπάθεια να αποδοθούν τα αντίστοιχα ονόματα από τη βιβλιογραφία (α) corona inception, (β) streamer propagation/streamer growth/leader propagation και (γ) leader propagation/development.

Στάδιο 1ο: Έναρξη Κορώνας

Το 1ο Στάδιο της Έναρξης Κορώνας (Corona Inception) ξεκινά με την εφαρμογή τάσης στα άκρα του μονωτήρα με σχετικά χαμηλές τιμές [11], [13] (CIGRE Working Group 33.01, 1991) (Mikropoulos, et al., 2023). Αυτή η τάση προκαλεί ιονισμό του αέρα γύρω και από τα δύο άκρα του μονωτήρα (Πυργιώτη, 2019) και είναι ο λόγος που ξεκινά το φαινόμενο που μπορεί να καταλήξει στην ηλεκτρική διάσπαση του διάκενου ανάμεσα στα άκρα του μονωτήρα, δηλαδή στην υπερπήδηση.



Σχήμα 2-2 Διαδικασία Διάσπασης Αέρα από (CIGRE Working Group 33.01, 1991).

Στάδιο 2ο: Διάδοση Νηματίων

Αν μετά το στάδιο της Έναρξης Κορώνας η ένταση του ηλεκτρικού πεδίο ανάμεσα στα δύο άκρα του διακένου αυξηθεί τότε αναπτύσσονται νημάτια. Τα νημάτια είναι μικρές περιοχές με ιονισμένο αέρα που φέρουν φορτία. Μπορεί να δημιουργηθούν στο ένα ή και στα δύο άκρα του διακένου και αναπτύσσονται υπό την επίδραση του πεδίου ώστε να γεφυρωθεί το διάκενο ανάμεσα στις αντίθετα φορτισμένες περιοχές στα άκρα του διακένου. Αν η ένταση του πεδίου ξεπεράσει μια τιμή κατωφλίου, έστω E_0, τότε θεωρείται ότι τα νημάτια έχουν έρθει σε επαφή και ακολουθεί το 3ο Στάδιο της Διάδοσης Οχετού. Αν οποιαδήποτε στιγμή πριν έρθουν σε επαφή τα νημάτια η ένταση του πεδίου πέσει σε τιμές μικρότερες του E_0 παύει η διάδοση νηματίων.

Στάδιο 3ο: Διάδοση Οχετού

Με την ολοκλήρωση του 2ου Σταδίου τα φορτισμένα ιόντα στα νημάτια υπό την επίδραση του πεδίου Ε στα άκρα του διακένου, εάν αυτό παραμένει μεγαλύτερο από E_0, θα έρθουν σε επαφή. Δηλαδή μετά την επαφή των νηματίων θα έχει δημιουργηθεί Οχετός, με την ίδια έννοια όπως και στα κεραυνικά πλήγματα, ο οποίος διαδίδεται (κινείται) για να καλύψει το διάκενο ανάμεσα στα δύο άκρα και έτσι ξεκινά το 3ο Στάδιο της Διάδοση Οχετού. Αν κατά την Διάδοση του Οχετού και πριν προλάβει να γεφυρωθεί το διάκενο, η μέση ένταση του πεδίου του διάκενου που δεν έχει ακόμα διασπαστεί βρεθεί σε τιμή μικρότερη της τιμής κατωφλίου E_0, η διάδοση Οχετού σταματά (Datsios, et al., 2011). Όταν ο Οχετός κατά τη διάδοσή του γεφυρώσει το διάκενο τότε έχουμε την υπερπήδηση του μονωτήρα, δηλαδή την ηλεκτρική εκκένωση ανάμεσα στα άκρα του (Datsios, et al., 2011).

Η ανωτέρω περιγραφή αποτελεί μια απλοποίηση της διαδικασίας ενός σύνθετου φυσικού φαινομένου και θα πρέπει να θεωρηθεί ως ενδεικτική.

Έστω t_c, η συνολική χρονική διάρκεια του μηχανισμού υπερπήδησης ως αποτέλεσμα της διάσπασης του αέρα, δηλαδή το χρονικό διάστημα από τη χρονική στιγμή πριν την έναρξη του 1ου Σταδίου (Έναρξη Κορώνας) έως και την ολοκλήρωση του 3ου Σταδίου (Διάδοση Οχετού) δηλαδή την εκδήλωση της ηλεκτρικής εκκένωσης και την υπερπήδηση. Αυτό το

χρονικό διάστημα θα είναι ίσο με το άθροισμα των χρονικών διαστημάτων που διαρκεί κάθε ένα από τα τρία διακριτά στάδια, καθώς αυτά συμβαίνουν διαδοχικά. Ο χρόνος αυτός t_c δίνεται από τη σχέση (Datsios, et al., 2011):

$$t_c = t_i + t_s + t_l \quad (5)$$

Όπου,

- t_i: η χρονική διάρκεια του 1ου Σταδίου (Έναρξη Κορώνας)
- t_s: η χρονική διάρκεια του 2ου Σταδίου (Ανάπτυξη Νηματίων)
- t_l: η χρονική διάρκεια του 3ου Σταδίου (Διάδοση Οχετού)

Ο χρόνος t_i είναι πολύ μικρός και προσεγγιστικά θεωρείται μηδενικός (Datsios, et al., 2011), ειδικά για τις περιπτώσεις κρουστικών κεραυνικών πληγμάτων με μικρούς χρόνους μετώπου όπου η σχετικά μικρή τάση που απαιτείται για την Έναρξη Κορώνας επιτυγχάνεται πολύ γρήγορα. Ο χρόνος t_s είναι περίπου ίσος με το 30% του t_c (CIGRE Working Group 33.01, 1991).

2.3 Μοντελοποίηση και Μαθηματικές Εκφράσεις Υπερπήδησης Μονωτήρων

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες μαθηματικές εκφράσεις και μέθοδοι για την μοντελοποίηση της υπερπήδησης των μονωτήρων.

Η υπερπήδηση των μονωτήρων μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας τις εξής μεθόδους (CIGRE Working Group 33.01, 1991) (Datsios, et al., 2011):

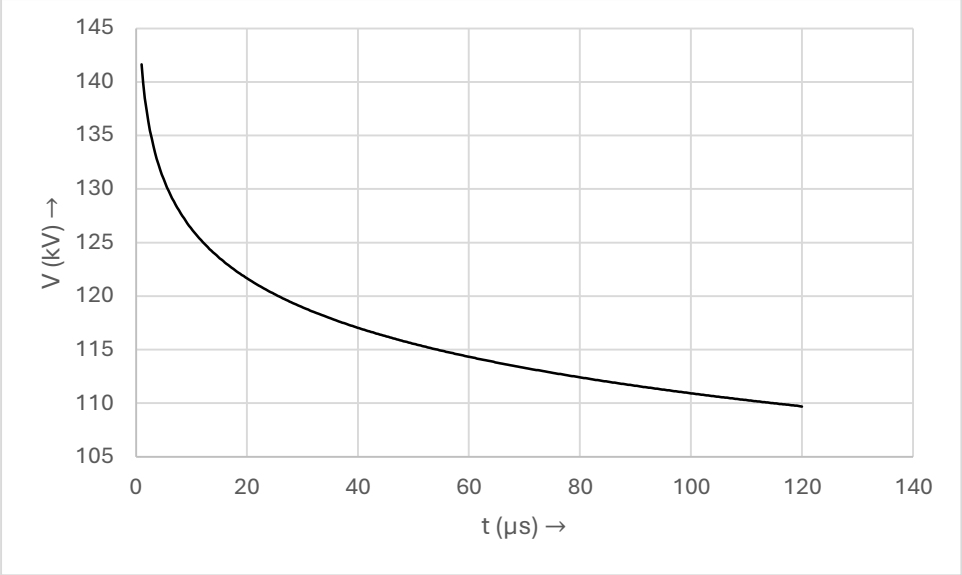
- Καμπύλες Τάσης-Χρόνου
- Μέθοδος ολοκλήρωσης
- Μοντέλα Διάδοσης Οχετού

2.3.1 Καμπύλες Τάσης-Χρόνου (V-t)

Οι καμπύλες Τάσης-Χρόνου αποτυπώνουν τη μέγιστη τιμή της τάσης στα άκρα του διακένου συναρτήσει του χρόνου έως την εκκένωση. Συνήθως αυτές οι καμπύλες αποτυπώνονται βάσει πειραματικών δεδομένων και αφορούν συγκεκριμένους μονωτήρες που υποβάλλονται σε κρουστικές καταπονήσεις τυποποιημένων πληγμάτων (CIGRE Working Group 33.01, 1991).

Άρα, οι καμπύλες Τάσης-Χρόνου είναι αλληλένδετες με τα δοκίμια, τις πειραματικές διατάξεις και τις συνθήκες των πειραματικών δοκιμών. Συνήθως τα σχετικά πειράματα περιορίζονται στα τυπικά κεραυνικά πλήγματα όπως αυτά που ορίζονται από τα πρότυπα π.χ. 1.2/50 (μs/μs). Μάλιστα η καμπύλη Τάσης-Χρόνου ορίστηκε κατά τον αρχικό της ορισμό, ως: "*Καμπύλη Τάσης-Χρόνου καλείται η γραφική παράσταση του μεγέθους κορυφής της τυπικής τάσης διάσπασης υπό διέγερση 1.2 μs x 50 μs συναρτήσει του χρόνου έως τη διάσπαση*" (Whitehead, et al., 1993). Οι καμπύλες Τάσης-Χρόνου ξεκινούν τη χρονική στιγμή που η τάση στα άκρα του διάκενου ή του μονωτήρα ξεπεράσει μια τιμή που καλείται ***Κρίσιμη Τάση Υπερπήδησης (CFO)*** και αποτυπώνει την τάση έως και τη χρονική στιγμή της εκκένωσης.

Άρα θα ήταν εξαιρετικά χρήσιμο να εξαχθεί από την καμπύλη Τάσης-Χρόνου (δηλαδή από τα πειραματικά δεδομένα), συμπέρασμα για την τιμή της Κρίσιμης Τάση Υπερπήδησης (CFO) καθώς η υπέρβαση αυτής της τιμής μπορεί να θεωρηθεί ότι θα καταλήξει στην εκκένωση και άρα στην υπερπήδηση του μονωτήρα.



Σχήμα 2-3 Τυπική Καμπύλη Τάσης-Χρόνου από τη σχέση (6) (δημιουργήθηκε με excel).

Όμως πριν τη γενικευμένη χρήση των καμπύλων Τάσης-Χρόνου θα πρέπει να εξεταστούν οι περιορισμοί που υφίστανται. Για παράδειγμα, οι καμπύλες Τάσης-Χρόνου δεν εμπεριέχουν όλους τους παράγοντες που συσχετίζονται άμεσα με την γενική και φυσική διαδικασία της διάσπασης που οδηγεί στην υπερπήδηση του μονωτήρα όπως: τα χαρακτηριστικά του πλήγματος πχ. μορφή, χρόνους μετώπου/ουράς (αναφέρονται μόνο στα τυποποιημένα πλήγματα των δοκιμών), τα χαρακτηριστικά του μονωτήρα πχ. την διαμόρφωση της γεωμετρίας του (αναφέρονται μόνο στους υπό δοκιμή μονωτήρες), κλπ. Επιπρόσθετα, οι καμπύλες Τάσης-Χρόνου εμφανίζουν δυσκολία στην απεικόνιση έντονα μεταβαλλόμενων φαινομένων πχ. έντονη ταλάντωση τάσης λόγω μεταβατικών φαινομένων και κατά κανόνα δεν αποτυπώνουν δεδομένα από πολλαπλά διαδοχικά πλήγματα καθώς συνήθως παράγονται μετά από δοκιμές για τα τυποποιημένα Πρώτα Πλήγματα που μάλιστα περιορίζονται μόνο στα Βραχέα Πλήγματα (CIGRE Working Group 33.01, 1991).

Για αυτούς τους λόγους οι καμπύλες Τάσης-Χρόνου δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευρέως και γενικευμένα. Έτσι, η χρήση τους θα πρέπει να περιορίζεται για την μοντελοποίηση μόνο εκείνων των μονωτήρων και υπό τις συνθήκες που προσομοιάζουν με τις πειραματικές συνθήκες από τις οποίες προέκυψαν.

Παρόλα αυτά οι καμπύλες Τάσης-Χρόνου μπορούν να αξιοποιηθούν για την εύρεση της Κρίσιμης Τάσης Υπερπήδησης, από την εμπειρική μαθηματική έκφραση που δίνεται στην (6) (CIGRE Working Group 33.01, 1991) η οποία συσχετίζει την Κρίσιμη Τάση Υπερπήδησης, με το μήκος του διακένου ή του μονωτήρα και το χρόνο έως την διάσπαση.

Σύμφωνα με το (Whitehead, et al., 1993), η τάση που υπερβαίνει την Κρίσιμη Τάση Υπερπήδησης (CFO) αναφέρεται ως Τάση Έναρξης της Καμπύλης Τάσης-Χρόνου και ορίζει την έναρξη της καμπύλης Τάσης-Χρόνου. Έτσι, είναι δυνατό μια υπέρταση λόγω κεραυνικού πλήγματος που υπερβαίνει την Κρίσιμη Τάση Υπερπήδησης (critical flashover voltage - CFO), όπως αυτή καθορίζεται από τα τυπικά πλήγματα των δοκιμών να οδηγήσει σε υπερπήδηση. Όμως αυτή η τάση μπορεί να μην διαρκεί χρονικά αρκετά ώστε να ολοκληρωθεί το 2^{ο} Στάδιο (Διάδοση Οχετού) που θα προκαλέσει την εκκένωση κατά το 3^{ο} Στάδιο (Ανάπτυξη Οχετού). Άρα, η διηλεκτρική αντοχή των μονωτήρων εξαρτάται από το πλάτος, τη διάρκεια και την πολικότητα του κύματος που εφαρμόζεται στο διάκενο. Επίσης, εμπλέκονται και άλλα

φαινόμενα. Για παράδειγμα, η υπέρταση λόγω του κεραυνικού πλήγματος μπορεί να προκαλέσει την εισαγωγή επαγωγικής συνιστώσας στην ωμική αντίδραση της γείωσης των στύλων. Επιπρόσθετα μπορεί να προκληθεί αποκοπή της διέγερσης λόγω των ανακλώμενων κυμάτων που ταξιδεύουν στους γειτονικούς με το πλήγμα στύλους.

Από τις σχετικές μελέτες που αναφέρονται στο (Whitehead, et al., 1993) έχει δειχθεί ότι η εμπειρική έκφραση όπως στην (6) μπορεί σε ικανοποιητικό βαθμό να εκφράσει την τιμή της Κρίσιμης Τάσης Υπερπήδησης για χρόνους υπερπήδησης 2 μs έως 16 μs (Whitehead, et al., 1993). Αυτός είναι ο και λόγος που η CIRGE (CIGRE Working Group 33.01, 1991) συνιστά τη χρήση της.

Η έκφραση αυτή δίνεται στην (6) (Datsios, et al., 2011) (CIGRE Working Group 33.01, 1991) (Whitehead, et al., 1993):

$$U_{CFO} = \left(400 + \frac{710}{t_c^{0.75}}\right) d_g \tag{6}$$

Όπου:

- U_{CFO}: η Κρίσιμη Τάση Υπερπήδησης που καθορίζεται από τα τυποποιημένα πλήγματα των δοκιμών, (kV)
- t_c: ο χρόνος έως την υπερπήδηση, για t_c από 2 έως 16 μs, (μs)
- d_g: το μήκος του διακένου ή του μονωτήρα, (m)

2.3.2 Μέθοδος Ολοκλήρωσης

Σύμφωνα με το (CIGRE Working Group 33.01, 1991) η βάση όλων των μεθόδων ολοκλήρωσης που έχουν κατά καιρούς προταθεί είναι η εύρεση μιας σχέσης που θα συμπεριλαμβάνει δεδομένα από τις τυποποιημένες πειραματικές δοκιμές αλλά και παράγοντες που θα προσαρμόζονται για την υπό εξέταση περίπτωση και θα αποφαίνεται εάν θα συμβεί υπερπήδηση. Όλες οι σχετικές μελέτες (υπάρχει εκτενής βιβλιογραφία στα (CIGRE Working Group 33.01, 1991) (Datsios, et al., 2011) (Mikropoulos, et al., 2023)) προσπαθούν να ενσωματώσουν τα χαρακτηριστικά της φυσικής διαδικασίας εξέλιξης του φαινομένου και βασίζονται στις εξής παραδοχές (CIGRE Working Group 33.01, 1991):

- υπάρχει μια ελάχιστη τάση U_0 η υπέρβαση της οποίας θα προκαλέσει την έναρξη ή τη συνέχεια της διάσπασης.
- ο χρόνος έως και την υπερπήδηση είναι συνάρτηση της τιμής και της χρονικής διάρκειας της εφαρμοζόμενης στο διάκενο τάσης $u(t)$ όσο αυτή υπερβαίνει την ελάχιστη τάση U_0.
- Υπάρχει ένα μοναδικό σύνολο σταθερών k που σχετίζονται με τη διάσπαση για κάθε διαμόρφωση μονωτήρα.

Η γενικευμένη σχέση που διαμορφώθηκε δίνεται στην (7) (CIGRE Working Group 33.01, 1991):

$$DE = \int_{t_0}^{t_c} (u(t) - U_0)^k dt \tag{7}$$

Όπου:

- DE: Σταθερά Φαινομένου Διάσπασης, το αποτέλεσμα του ολοκληρώματος (kV^k μs).

- t_0: η χρονική στιγμή (μs) κατά την οποία η εφαρμοζόμενη τάση $u(t)$ (kV) υπερβαίνει την ελάχιστη τάση U_0 (kV), από πειραματικά δεδομένα τυποποιημένων δοκιμών.
- t_c: η χρονική στιγμή έως την υπερπήδηση (μs), από πειραματικά δεδομένα τυποποιημένων δοκιμών (θα μπορούσε να εξαχθεί και από την αντίστοιχη καμπύλη Τάσης-Χρόνου),
- k: σταθερά ή σταθερές συσχετιζόμενες με συγκεκριμένο (τύπο) μονωτήρα, από πειραματικά δεδομένα τυποποιημένων δοκιμών.

Αν το DE που καλείται Σταθερά Φαινομένου Διάσπασης (Disruptive Effect Constant) (CIGRE Working Group 33.01, 1991) ή Κρίσιμη Επίδραση Διάσπασης (Critical Disruptive Effect) (Datsios, et al., 2011), υπερβαίνει την τιμή που έχει βρεθεί από μελέτες για συγκεκριμένο τύπο μονωτήρα τότε θεωρείται ότι θα συμβεί υπερπήδηση.

Στο (CIGRE Working Group 33.01, 1991) δίνονται τα αποτελέσματα διάφορων μελετών για τις τιμές των DE, U_0 και k. Για παράδειγμα για συστοιχία μονωτήρα 8 στοιχείων βρέθηκαν DE = 369 kV μs και U_0= 643 kV για θετική πολικότητα και DE = 525 kV μs και U_0= 639 kV για αρνητική πολικότητα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι περίπου το 90% των τιμών της U_0 ήταν κοντά στο 50% της μέγιστης τιμής. Αντίστοιχα αποτελέσματα υπήρξαν από άλλη μελέτη (αναφέρεται στο (CIGRE Working Group 33.01, 1991)) για συστοιχίες μονωτήρων 6, 9 και 12 στοιχείων για τιμές k = 2.25 και and U_0= 58 kV ανά στοιχείο μονωτήρα.

Αν και εύκολα εφαρμόσιμη, η Μέθοδος Ολοκλήρωσης περιορίζεται από το ότι πρέπει να έχουν προηγηθεί πειραματικές δοκιμές για κάθε συγκεκριμένο τύπο μονωτήρα ώστε πριν την εφαρμογή να έχουν εξαχθεί τα DE, U_0, k και t_c.

2.3.3 Μοντέλα Ανάπτυξης Οχετού

Στις μελέτες για τα μοντέλα ανάπτυξης Οχετού γίνεται προσπάθεια συσχετισμού της ταχύτητας διάδοσης του Οχετού $v_l(t)$ με την εφαρμοζόμενη στο διάκενο τάση $u(t)$ και το μήκος του διακένου που απομένει μέχρι την διάσπαση.

Κατά το στάδιο αυτό ένα υψηλής τιμής ρεύμα $i(t)$ που καλείται ***Ρεύμα Προεκκένωσης (Predischarge Current)*** ρέει στο διάκενο. Το ρεύμα αυτό θεωρείται ανάλογο της ταχύτητας του Οχετού $v_l(t)$ και μιας σταθεράς αναλογικότητας φορτίου q σύμφωνα με τη σχέση :

$$i(t) = q v_l(t) = q \frac{dl}{dt} \tag{8}$$

Όπου

- q: σταθερά αναλογικότητας φορτίου (C/m)
- $v_l(t)$: η ταχύτητα διάδοσης του Οχετού
- l: το μήκος του Οχετού (m)

Σύμφωνα με σχετικές μελέτες (Pigini, et al., 1989) η σταθερά αναλογικότητας φορτίου q λαμβάνει τιμές από 100 έως 700 C/m, εξαρτώμενες από την πολικότητα, τη διάταξη και το μήκος του διακένου, με τιμές 300 έως 400 C/m να είναι γενικά αποδεκτές (Datsios & Mikropoulos, 2016).

Στάδιο 1ο Έναρξη Κορώνας

Ο χρόνος t_i είναι πολύ μικρός και προσεγγιστικά θεωρείται μηδενικός (CIGRE Working Group 33.01, 1991) (Datsios, et al., 2011), ειδικά για τις περιπτώσεις Βραχέων πληγμάτων λόγω της έντονης κλιμάκωσης του ηλεκτρικού πεδίου E (kV/m) στα άκρα του διακένου, η σχετικά μικρή

τιμή της τάσης που απαιτείται για την Έναρξη Κορώνας επιτυγχάνεται πολύ γρήγορα. Θεωρείται δηλαδή και έχει δειχθεί από πειραματικές δοκιμές όπως αναφέρεται στα (CIGRE Working Group 33.01, 1991) (Datsios, et al., 2011) ότι σε όλες τις διατάξεις (ηλεκτροδίου-ηλεκτροδίου, ηλεκτροδίου-επιφανείας, άκρα μονωτήρων διαφόρων τύπων) και ανεξάρτητα της πολικότητας, για μήκη διακένων έως μερικά μέτρα, ισχύει:

$$t_i \cong 0 \tag{9}$$

Στάδιο 2ο Διάδοση Νηματίων

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που δυσχεραίνουν την εύρεση ενός ενιαίου τρόπου υπολογισμού της ταχύτητας Διάδοσης Νηματίων και άρα και τον υπολογισμό του χρόνου t_s (το μήκος του διακένου είναι γνωστό). Τέτοιοι παράγοντες είναι η διαμόρφωση της διάταξης πχ. ηλεκτρόδιο-ηλεκτρόδιο, ηλεκτρόδιο-επίπεδο, τύπος μονωτήρα, η πολικότητα του πεδίου και γενικά η πολυπλοκότητα του φαινομένου.

Έχει δειχθεί στο (Pigini, et al., 1989) ότι ανεξάρτητα από την πολικότητα και τη διαμόρφωση της διάταξης, ο χρόνος t_s μπορεί να ληφθεί εμμέσως συναρτήσει της έντασης του πεδίου E (kV/m). Μάλιστα μπορεί να εκφραστεί σε σχέση με τον λόγο ανάμεσα στη μέγιστη τιμή της έντασης του πεδίου πριν τη διάσπαση (E) και την τιμή της έντασης (E_{50}) που αντιστοιχεί στο 50% (U_{50}) της τάσης διάσπασης. Ο λόγος E/E_{50} καλείται *Παράγοντας Διακένου (Gap Factor)*. Οι μέσες τιμές των E και E_{50} από πειραματικά δεδομένα σε δοκιμαστικές διατάξεις ηλεκτροδίου-ηλεκτροδίου και ηλεκτροδίου-επιφανείας με Βραχέα πλήγματα 1.2/50 (μs/μs) (Pigini, et al., 1989) χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή της προσεγγιστικής γραμμικής σχέσης ανάμεσα στο $1/t_s$ και τον Παράγοντα Διακένου (E/E_{50}) όπως στην (10) (Pigini, et al., 1989) (CIGRE Working Group 33.01, 1991). Από αυτή τη σχέση θα μπορούσε να εξαχθεί μια προσεγγιστική τιμή για το t_s.

$$\frac{1}{t_s} = 1.25\left(\frac{E}{E_{50}}\right) - 0.95 \tag{10}$$

Όπου:

- E: η μέγιστη τιμή της έντασης του πεδίου στο διάκενο πριν τη διάσπαση, (kV/m)
- E_{50}: η τιμή της έντασης του πεδίου στο διάκενο που αντιστοιχεί στο 50% της τάσης που προκαλεί διάσπαση (kV/m).

Τιμές για: (α) τα E_{50} συναρτήσει του μήκους του διακένου (έως μερικά μέτρα) και (β) τους λόγους των E_{50} για διατάξεις ηλεκτροδίου-ηλεκτροδίου προς τα $E_{50,RP}$ ηλεκτροδίου-επιφανείας συναρτήσει του Παράγοντα Διακένου ($E_{50}/E_{50,RP}$), μπορούν να εξαχθούν με τη χρήση διαγραμμάτων που αποτυπώνουν προσεγγίσεις βασισμένες στα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα και δίνονται στα (Pigini, et al., 1989) (CIGRE Working Group 33.01, 1991). Όμως αυτά τα διαγράμματα έχουν διαμορφωθεί προσεγγιστικά από τα συγκεκριμένα πειραματικά δεδομένα και για διατάξεις ηλεκτρόδιο-ηλεκτρόδιο και ηλεκτρόδιο-επιφάνεια.

Γενικά όμως, και ανεξάρτητα από τη διαμόρφωση της διάταξης, το μήκος διακένου (για μήκη έως μερικά μέτρα) και την πολικότητα, ο χρόνος t_s εκτιμάται περίπου ίσος με 30% του συνολικού χρόνου έως τη διάσπαση t_c (CIGRE Working Group 33.01, 1991). Άρα χρησιμοποιώντας αυτή τη γενική εκτίμηση, το σφάλμα της εκτίμησης της τιμής του t_s θα εισάγει σφάλμα στην εκτίμηση του t_c που περιορίζεται περίπου στο 10% (CIGRE Working Group 33.01, 1991) το οποίο και μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτό ως συγκρίσιμο με το σφάλμα που μπορεί να προκύψει από τη χρήση των διαγραμμάτων και τη σχέση (11). Άρα θεωρείται ότι ο χρόνος t_s δίνεται από τη σχέση:

$$t_s \cong 0.3t_c \tag{11}$$

Στάδιο 3ο Διάδοση Οχετού

Ο χρόνος t_l είναι εξαρτώμενος από την ταχύτητα με την οποία κινείται ο Οχετός $v_l(t)$ κατά το στάδιο Διάδοσης Οχετού. Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες σχέσεις σε μια προσπάθεια συσχέτισης της ταχύτητας Διάδοσης του Οχετού $v_l(t)$ και του μήκους του διακένου που δεν έχει καλύψει ο Οχετός κατά την κίνησή του. Γενικά, τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι η ταχύτητα διάδοσης του Οχετού είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους του διακένου που δεν έχει ακόμη καλυφθεί κατά τη διάδοση του Οχετού και δίνεται από τη γενικευμένη σχέση (12) (CIGRE Working Group 33.01, 1991).

$$\mathrm{v}_l(\mathrm{t}) = g\big(u(t), d_g\big)\left[\frac{u(t)}{\big(d_g - l\big)} - f\big(d_g - l\big)\right] \tag{12}$$

Όπου:

- $\mathrm{v}_l(\mathrm{t})$: η στιγμιαία ταχύτητα διάδοσης του Οχετού, (m/s)
- $u(t)$: η στιγμιαία τάση στα άκρα του μονωτήρα ή του διακένου, (kV)
- d_g: το μήκος του μονωτήρα ή του διακένου, (m)
- l: το μήκος του Οχετού τη χρονική στιγμή t, (m)
- $g(\,)$: κάποια συνάρτηση με παραμέτρους τα $u(t)$ και d_g
- $f(\,)$: κάποια συνάρτηση με παράμετρο το διάστημα $d_g - l$, δηλαδή το διάστημα που απομένει έως τη διάσπαση (το E_0 συσχετίζεται με αυτό το διάστημα)

Στο (CIGRE Working Group 33.01, 1991) δίνεται η (13) όπως προτάθηκε στο (Pigini, et al., 1989) η οποία εκτός από το μήκος του εναπομείναντος διακένου $\big(d_g - l\big)$ και την στιγμιαία τάση $u(t)$ εμπλέκει και την Κρίσιμη Ένταση Πεδίου E_0, δηλαδή την ελάχιστη τιμή που θα πρέπει να έχει το πεδίο στο τμήμα του διακένου που δεν έχει ακόμα γεφυρωθεί ώστε να συνεχιστεί η διάδοση του Οχετού.

(Pigini, et al., 1989)

$$v_l(t) = dl/dt = 170 \cdot d_g \cdot \left[\frac{u(t)}{\big(d_g - l\big)} - E_0\right] \cdot e^{1.5\cdot 10^{-3}\cdot\frac{u(t)}{d_g}} \tag{13}$$

Όπου:

- $\mathrm{v}_l(\mathrm{t})$: η στιγμιαία ταχύτητα διάδοσης του Οχετού, (m/s)
- $u(t)$: η στιγμιαία τάση στα άκρα του μονωτήρα ή του διακένου, (kV)
- d_g: το μήκος του μονωτήρα ή του διακένου, (m)
- l: το μήκος του Οχετού τη χρονική στιγμή t, (m)
- E_0: η Κρίσιμη Ένταση Πεδίου, (kV/m)

Επίσης στο (CIGRE Working Group 33.01, 1991) προτείνεται ως η βέλτιστη προσέγγιση για την $v_l(t)$ η σχέση (14) στην οποία έχει εισαχθεί μία σταθερά k_3.

(CIGRE Working Group 33.01, 1991)

$$v_l(t) = dl/dt = k_3 \cdot u(t) \cdot \left[\frac{u(t)}{\big(d_g - l\big)} - E_0\right] \tag{14}$$

Όπου:

- $\mathrm{v}_l(\mathrm{t})$: η στιγμιαία ταχύτητα διάδοσης του Οχετού, (m/s)

- $u(t)$: η στιγμιαία τάση στα άκρα του μονωτήρα ή του διακένου, (kV)
- d_g: το μήκος του μονωτήρα ή του διακένου, (m)
- l: το μήκος του Οχετού τη χρονική στιγμή t, (m)
- E_0: η Κρίσιμη Ένταση Πεδίου, (kV/m)
- k_3: σταθερά, (m^2/(kV^2· s))

Οι τιμές για τα k_3 και E_0 μπορούν βρεθούν με τη χρήση πινάκων από τη σχετική βιβλιογραφία και να επιλεγούν ανάλογα με τη διάταξη και την πολικότητα που μελετάται. Οι τιμές για τα k_3 και E_0 έχουν βρεθεί μετά από πειραματικές δοκιμές συνήθως με τα τυποποιημένα πλήγματα και για διάφορες διατάξεις και πολικότητες πλήγματος. Τέτοιοι πίνακες για τα k_3 και E_0 της (14) υπάρχουν στο (CIGRE Working Group 33.01, 1991) και στα (Datsios, et al., 2011) (Datsios & Mikropoulos, 2014) (Datsios & Mikropoulos, 2016). Για παράδειγμα, για τα k_3 και E_0 της (14) δίνονται για μονωτήρα τύπου κώδωνα οι τιμές k_3=1.2 m^2/(kV^{2}s) και E_0=520 kV/m, για θετική πολικότητα και k_3=1.3 m^2/(kV^{2}s) και E_0=600 kV/m, για αρνητική πολικότητα.

Εκτενής ανάλυση των εκφράσεων που έχουν κατά καιρούς προταθεί για τον υπολογισμό της ταχύτητας του Οχετού $v_l(t)$ υπάρχει στα (Datsios, et al., 2011) (Datsios & Mikropoulos, 2014) (Datsios & Mikropoulos, 2016). Ανάμεσα σε αυτές περιλαμβάνονται η σχέση (15) που προτάθηκε στο (Wagner & Hileman, 1961) και η σχέση (16) που προτάθηκε στο (Wang, et al., 2014). Η (15) και η (16) έχουν όμοια μορφή με την (14) με τη διαφορά ότι οι σταθερές k έχουν διαφορετικές διαστάσεις για να αντιμετωπισθεί η εισαγωγή του διακένου στον αριθμητή της (15) και η απουσία της στιγμιαίας τάσης $u(t)$ από τον αριθμητή και των δύο.

(Wagner & Hileman, 1961)

$$v_l(t) = dl/dt = k \cdot d_g \cdot \left[\frac{u(t)}{(d_g - l)} - E_0\right] \quad (15)$$

(Wang, et al., 2014)

$$v_l(t) = dl/dt = k_0 \cdot \left[\frac{u(t)}{(d_g - l)} - E_0\right] \quad (16)$$

Όπου:

- $v_l(t)$: η στιγμιαία ταχύτητα διάδοσης του Οχετού, (m/s)
- $u(t)$: η στιγμιαία τάση στα άκρα του μονωτήρα ή του διακένου, (kV)
- d_g: το μήκος του μονωτήρα ή του διακένου, (m)
- l: το μήκος του Οχετού τη χρονική στιγμή t, (m)
- E_0: η Κρίσιμη Ένταση Πεδίου, (kV/m)
- k: σταθερά, (m/(kV·s))
- k_0: σταθερά, (m^2/(kV·s))

Και πάλι οι τιμές για τα k, k_0 και E_0 των (15) και (16) μπορούν να βρεθούν από τους πίνακες που είναι διαθέσιμοι στα (Datsios, et al., 2011) (Datsios & Mikropoulos, 2014) (Datsios & Mikropoulos, 2016). Για παράδειγμα, για τα k και E_0 της (14) δίνονται για τη διάταξη ηλεκτροδίου-ηλεκτροδίου οι τιμές k= 880.2 m/(kV·s) και E_0= 576 kV/m και για τα k_0 και E_0 της (16) δίνονται για μονωτήρα τύπου κώδωνα οι τιμές k_0= 2900 m^2/(kV·s) και E_0= 580 kV/m, για θετικό πλήγμα και οι τιμές k_0= 2500 m^2/(kV·s) και E_0= 640 kV/m, για αρνητικό πλήγμα.

Όταν το l γίνει ίσο ή μεγαλύτερο από d_g θεωρείται (Datsios, et al., 2011) (Datsios & Mikropoulos, 2014) (Datsios & Mikropoulos, 2016) ότι το διάκενο έχει γεφυρωθεί κατά τη διάδοση του Οχετού και άρα έχει προκληθεί διάσπαση.

$$l \geq d_g \tag{17}$$

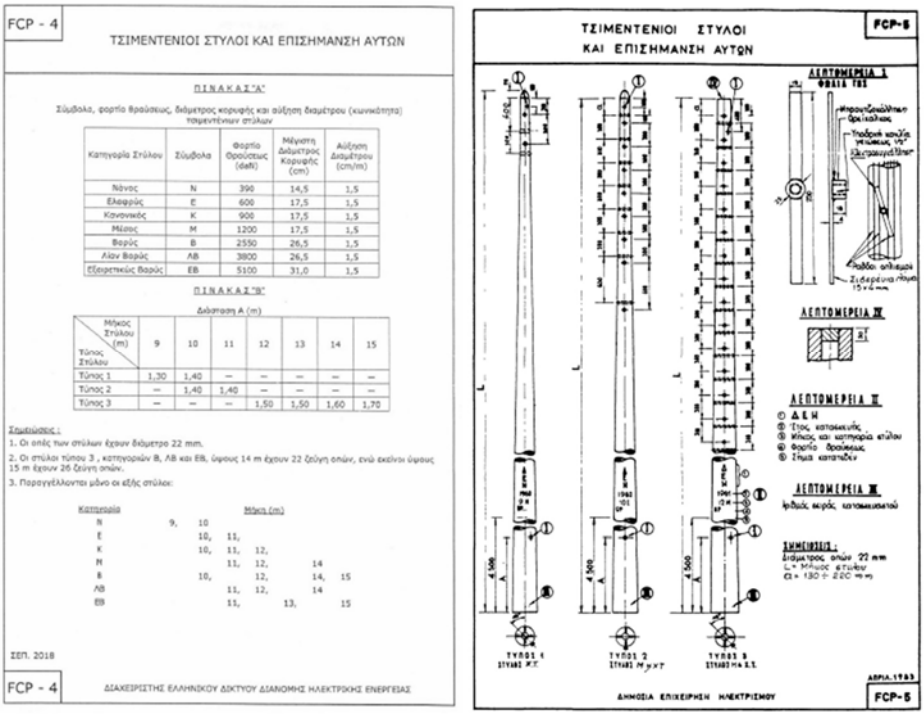
Άρα η σχέση (17) (Datsios, et al., 2011) (Datsios & Mikropoulos, 2014) (Datsios & Mikropoulos, 2016) αποτελεί το *Κριτήριο Διάσπασης* και η χρονική στιγμή που συμβαίνει δίνει τον χρόνο t_l.

3 Κεφάλαιο: Στύλοι Στήριξης και Αγωγοί Εναερίων Γραμμών Μέσης Τάσης

3.1 Στύλοι στήριξης εναερίων γραμμών μεταφοράς μέσης τάσης

3.1.1 Επιλογή στύλου στήριξης

Στις "Τυποποιημένες Κατασκευές Διανομής" (ΔΕΔΔΗΕ, 1974-2018) στις σελίδες 358, 359 (FCP-4,5) στο κεφάλαιο "Τσιμεντένιοι Στύλοι και Επισήμανση αυτών" αναφέρεται ότι οι τσιμεντένιοι στύλοι για δίκτυα μέσης τάσης ανήκουν, είτε στην κατηγορία τύπου 2, είτε στην κατηγορία τύπου 3. Χωρίζονται περαιτέρω σε υποκατηγορίες ανάλογα με το ύψος και το βάρος τους.


FCP - 4

ΤΣΙΜΕΝΤΕΝΙΟΙ ΣΤΥΛΟΙ ΚΑΙ ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΗ ΑΥΤΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ "Α"

Σύμβολα, φορτίο θραύσεως, διάμετρος κορυφής και αύξηση διαμέτρου (κωνικότητα) τσιμεντένιων στύλων

Κατηγορία Στύλου	Σύμβολα	Φορτίο Θραύσεως (daN)	Μέγιστη Διάμετρος Κορυφής (cm)	Αύξηση Διαμέτρου (cm/m)
Νάνος	N	390	14,5	1,5
Ελαφρύς	E	600	17,5	1,5
Κανονικός	K	900	17,5	1,5
Μέσος	M	1200	17,5	1,5
Βαρύς	B	2550	26,5	1,5
Λίαν Βαρύς	ΛΒ	3800	26,5	1,5
Εξαιρετικώς Βαρύς	ΕΒ	5100	31,0	1,5

ΠΙΝΑΚΑΣ "Β"

Διάταση Α (m)

Μήκος Στύλου (m) / Τύπος Στύλου	9	10	11	12	13	14	15
Τύπος 1	1,30	1,40	–	–	–	–	–
Τύπος 2	–	1,40	1,40	–	–	–	–
Τύπος 3	–	–	–	1,50	1,50	1,60	1,70

Σημειώσεις :

1. Οι οπές των στύλων έχουν διάμετρο 22 mm.
2. Οι στύλοι τύπου 3 , κατηγοριών Β, ΛΒ και ΕΒ, ύψους 14 m έχουν 22 ζεύγη οπών, ενώ εκείνοι ύψους 15 m έχουν 26 ζεύγη οπών.
3. Παραγγέλλονται μόνο οι κάτωθι στύλοι:

Κατηγορία	Μήκη (m)
N	9, 10
E	10, 11,
K	10, 11, 12,
M	11, 12, 14
B	10, 12, 14, 15
ΛΒ	11, 12, 14
ΕΒ	11, 13, 15

ΣΕΠ. 2018

FCP - 4 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σχήμα 3-1 "Τσιμεντένιοι Στύλοι και Επισήμανση αυτών", σελίδες FCP-4 και FCP-5) από το "Τυποποιημένες Κατασκευές Διανομής" (ΔΕΔΔΗΕ, 1974-2018).

Επιλέχθηκε να μελετηθεί ο στύλος στήριξης με οπλισμένο σκυρόδεμα, με χαρακτηριστικά:

- Τύπος στύλου: Τύπος 3
- Μήκος στύλου: 14m
- Κατηγορία στύλου: Λίαν Βαρύς(ΛΒ)
- Φορτίο Θραύσεως: 3800kp
- Μέγιστη Διάμετρος Κορυφής: 26,5 cm
- Αύξηση Διαμέτρου: 1,5 cm/m

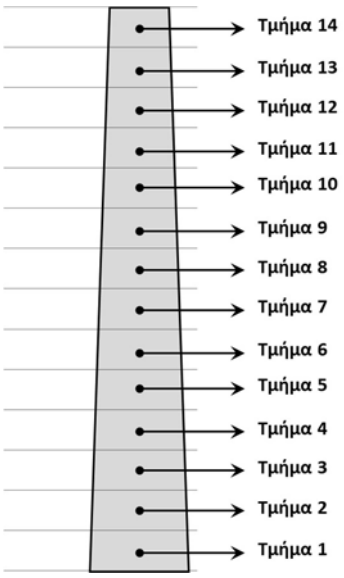
3.1.2 Υπολογισμοί ηλεκτρικών παραμέτρων στύλων από οπλισμένο σκυρόδεμα

Για τους υπολογισμούς και τη δημιουργία του ηλεκτρικού του ισοδυνάμου ο στύλος χωρίσθηκε σε 14 τμήματα. Το μήκος κάθε ενός από αυτά ορίσθηκε ίσο με 1m. Η επιλογή αυτή έγινε γιατί είναι γνωστή η αύξηση της διαμέτρου του στύλου ανά 1 m. Έτσι δημιουργήθηκαν 14 κόλουροι κώνοι ύψους 1m αλλά διαφορετικών ακτινών στην κορυφή και στη βάση τους, όπως στον Πίνακας 3-1.

Διαστάσεις στύλου (m)		
Ακτίνα	**Διάμετρος**	**Ύψος**
0,1325	0,265	14
0,1405	0,281	13
0,1485	0,297	12
0,1565	0,313	11
0,1645	0,329	10
0,1725	0,345	9
0,1805	0,361	8
0,1885	0,377	7
0,1965	0,393	6
0,2045	0,409	5
0,2125	0,425	4
0,2205	0,441	3
0,2285	0,457	2
0,2365	0,473	1
0,2445	0,489	0

κορυφή

βάση



Πίνακας 3-1: Κατάτμηση στύλου σε 14 τμήματα

3.1.3 Υπολογισμός επαγωγικής αντίστασης πλέγματος χάλυβα

Ο υπολογισμός της επαγωγικής αντίστασης του πλέγματος χάλυβα $L_{s,i}$ κάθε ενός από τα 14 τμήματα γίνεται από το (Jiang, et al., 2013).

$$L_{s,i} = \frac{\mu_o h_i}{2\pi}\left(\ln\left(\frac{2h_i}{r_i}\right) - 1 - \frac{\mu}{\mu_o}\ln(c_i)\right) \tag{18}$$

Όπου:

- μ_o: η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, με $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H
- μ/μ_o: η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του χάλυβα, με $\mu/\mu_o = 100$
- h_i: το ύψος του κάθε κωνικού τμήματος, με $h_1 = h_2 = \cdots = h_{14} = 1\ \mathrm{m}$.
- r_i: η μέση ακτίνα του κάθε κωνικού τμήματος,
- c_i: ο λόγος της μέσης εσωτερικής ακτίνας ($r_{i,\mathrm{in.}}$) του κωνικού τμήματος προς τη μέση εξωτερική ($r_{i,\mathrm{out}}$) του.

Ο υπολογισμός των r_i της (18) γίνεται επίσης από το (Jiang, et al., 2013).

$$r_i = \frac{r_{i,u}h_{i,u} + r_{i,m}h_i + r_{i,d}h_{i,d}}{2h_i} \tag{19}$$

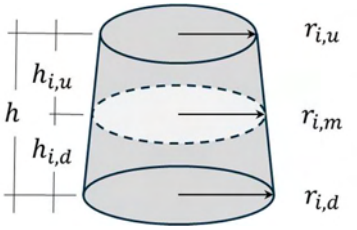
Όπου για κάθε τμήμα (i) του κόλουρου κώνου:

- $r_{i,u}$, $r_{i,m}$ και $r_{i,d}$: οι ακτίνες στην κορυφή, στο μέσο και στη βάση, αντίστοιχα.

- $h_{i,u}$ και $h_{i,d}$: το ύψος από την κορυφή έως το μέσο και από μέσο έως τη βάση, αντίστοιχα.

Από την κατάτμηση προκύπτει ότι για κάθε $i = 1, \cdots, 14$, τα $h_{i,u} = h_{i,d} = 0.5\text{m}$ και $h_\iota = 1\text{m}$. Για τον υπολογισμό του $r_{i,m}$ θεωρήθηκε ότι $r_{i,m} = (r_{i,u} + r_{i,d})/2$. Γνωρίζοντας ότι ο στύλος που επιλέχθηκε έχει διάμετρο κορυφής ίση με 0.265 m, έχουμε τα αποτελέσματα για τα r_i, όπως στον Πίνακας 3-2 (όλες οι μονάδες σε m).

r_i	$r_{i,u}$	$r_{i,d}$	$r_{i,m}$	$h_{i,u}$	$h_{i,d}$	h_i
0,1375	0,1325	0,1405	0,1365	0,5	0,5	1
0,1455	0,1405	0,1485	0,1445	0,5	0,5	1
0,1535	0,1485	0,1565	0,1525	0,5	0,5	1
0,1615	0,1565	0,1645	0,1605	0,5	0,5	1
0,1695	0,1645	0,1725	0,1685	0,5	0,5	1
0,1775	0,1725	0,1805	0,1765	0,5	0,5	1
0,1855	0,1805	0,1885	0,1845	0,5	0,5	1
0,1935	0,1885	0,1965	0,1925	0,5	0,5	1
0,2015	0,1965	0,2045	0,2005	0,5	0,5	1
0,2095	0,2045	0,2125	0,2085	0,5	0,5	1
0,2175	0,2125	0,2205	0,2165	0,5	0,5	1
0,2255	0,2205	0,2285	0,2245	0,5	0,5	1
0,2335	0,2285	0,2365	0,2325	0,5	0,5	1
0,2415	0,2365	0,2445	0,2405	0,5	0,5	1



Πίνακας 3-2 Υπολογισμός $r_{i,m}$ και r_i.

Για τον υπολογισμό των c_i της (1) έγινε από το [2].

$$c_i = \frac{r_{i,\text{in}}}{r_{i,\text{out}}} \tag{20}$$

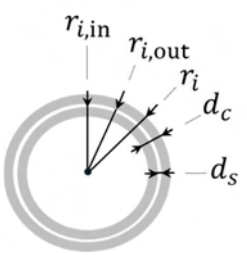
Ο στύλος είναι κενός στο μέσο του, ενώ περιμετρικά έχει σκυρόδεμα πάχους $d_c = 0{,}10\text{m}$. Επίσης το πλέγμα χάλυβα έχει κωνικό σχήμα, είναι τοποθετημένο ακτινικά στο μέσο του σκυροδέματος και αποτελείται από ράβδους διαμέτρου $d_s = 0{,}03\text{m}$. Προσεγγίζοντας το πλέγμα χάλυβα ως μια ενιαία μεταλλική κωνική δομή θα πρέπει να βρεθεί η μέση εσωτερική ($r_{i,\text{in}}$) και η μέση εξωτερική ακτίνα ($r_{i,\text{out}}$) κάθε τμήματος i ώστε να υπολογισθούν από την (19) τα c_i. Τα $r_{i,\text{in}}$ και $r_{i,\text{out}}$ μπορούν να υπολογισθούν, αντίστοιχα, ως εξής:

$$r_{i,\text{in}} = r_i - 0.065\text{m} \text{ και } r_{i,\text{out}} = r_i - 0.035\text{m} \tag{21}$$

Από την (20) και τις (21) έχουμε τα αποτελέσματα για τα c_i για κάθε τμήμα κόλουρου κώνου, όπως στον Πίνακας 3-3.

c_i	$r_{i,\text{in}}$ (m)	$r_{i,\text{out}}$ (m)
0,707317073	0,0725	0,1025
0,728506787	0,0805	0,1105
0,746835443	0,0885	0,1185
0,76284585	0,0965	0,1265

0,776951673	0,1045	0,1345
0,789473684	0,1125	0,1425
0,800664452	0,1205	0,1505
0,810725552	0,1285	0,1585
0,81981982	0,1365	0,1665
0,828080229	0,1445	0,1745
0,835616438	0,1525	0,1825
0,842519685	0,1605	0,1905
0,848866499	0,1685	0,1985
0,85472155	0,1765	0,2065



Πίνακας 3-3 Υπολογισμός c_i.

Από την (18) και τα αποτελέσματα των Πίνακας 3-2 και Πίνακας 3-3 υπολογίζονται οι τιμές των $L_{s,i}$ όπως στον πίνακα Πίνακας 3-4.

	$L_{s,i}$ (H)	h_i (m)	r_i (m)	μ/μ_o	c_i
$L_{s,14}$	**7,26098E-07**	1	0,1375	100	0,707317073
$L_{s,13}$	**6,65931E-07**	1	0,1455	100	0,728506787
$L_{s,12}$	**6,15165E-07**	1	0,1535	100	0,746835443
$L_{s,11}$	**5,71727E-07**	1	0,1615	100	0,76284585
$L_{s,10}$	**5,34115E-07**	1	0,1695	100	0,776951673
$L_{s,9}$	**5,01216E-07**	1	0,1775	100	0,789473684
$L_{s,8}$	**4,72184E-07**	1	0,1855	100	0,800664452
$L_{s,7}$	**4,46364E-07**	1	0,1935	100	0,810725552
$L_{s,6}$	**4,23244E-07**	1	0,2015	100	0,81981982
$L_{s,5}$	**4,02414E-07**	1	0,2095	100	0,828080229
$L_{s,4}$	**3,83545E-07**	1	0,2175	100	0,835616438
$L_{s,3}$	**3,66368E-07**	1	0,2255	100	0,842519685
$L_{s,2}$	**3,50661E-07**	1	0,2335	100	0,848866499
$L_{s,1}$	**3,3624E-07**	1	0,2415	100	0,85472155

Πίνακας 3-4: Υπολογισμός $L_{s,i}$.

3.1.4 Υπολογισμός ωμικής αντίστασης πλέγματος χάλυβα

Προσεγγίζουμε την ωμική αντίσταση του πλέγματος του χάλυβα $R_{s,i}$ κάθε τμήματος, θεωρώντας κάθε τμήμα ως έναν κυλινδρικό διάτρητο χαλύβδινο αγωγό με εσωτερική ακτίνα $r_{i,\text{in}}$, εξωτερική ακτίνα $r_{i,\text{out}}$ και ύψος h_i όπως στο Σχήμα 3-2 (β) με διατομή όπως στο Σχήμα 3-2 (γ). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η προσέγγιση δεν είναι ακριβής καθώς το μεταλλικό πλέγμα έχει τη μορφή όπως στο Σχήμα 3-2 (α), δηλαδή τα μεταλλικά στοιχεία έχουν διάκενα μεταξύ τους ενώ η προσέγγιση που ακολουθείται εδώ θεωρεί τον αγωγό ως ομοιογενώς χαλύβδινο.

(α) (β) (γ)

Σχήμα 3-2: Προσέγγιση χαλύβδινου πλέγματος

Ο υπολογισμός της ωμικής αντίστασης του πλέγματος του χάλυβα $R_{s,i}$ κάθε ενός από τα 14 τμήματα δίνεται από την εξίσωση:

$$R_{s,i} = \rho_s \frac{h_i}{S_{i,m}} \tag{22}$$

Όπου:

- ρ_s: η ειδική αντίσταση του χάλυβα, με $\rho_s = 1.6 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ Η
- h_i: το ύψος του κάθε κωνικού τμήματος, με $h_1 = h_2 = \cdots = h_{14} = 1\ \text{m}$.
- $S_{s,i}$: η μέση επιφάνεια του χάλυβα σε κάθε κωνικό τμήμα.

Η μέση επιφάνεια του χάλυβα $S_{s,i}$ σε κάθε κωνικό τμήμα μπορεί να προσεγγισθεί από την διαφορά της επιφάνειας του κύκλου στην εξωτερική και στην εσωτερική μέση ακτίνα κάθε τμήματος, από την εξίσωση:

$$S_{s,i} = \pi \cdot r_{i,\text{out}}^2 - \pi \cdot r_{i,\text{in}}^2 \tag{23}$$

Για $r_{i,\text{in}}$ και $r_{i,\text{out}}$ όπως στον Πίνακας 3-3 και τις (22) και (23), έχουμε:

	$R_{s,i}$ (Ω)	$S_{s,i}$ (m²)
$R_{s,14}$	**9,70087E-06**	0,01649336
$R_{s,13}$	**8,88823E-06**	0,01800133
$R_{s,12}$	**8,20122E-06**	0,01950929
$R_{s,11}$	**7,61279E-06**	0,02101725
$R_{s,10}$	**7,10315E-06**	0,02252522
$R_{s,9}$	**6,65746E-06**	0,02403318
$R_{s,8}$	**6,2644E-06**	0,02554115
$R_{s,7}$	**5,91517E-06**	0,02704911
$R_{s,6}$	**5,60281E-06**	0,02855708
$R_{s,5}$	**5,3218E-06**	0,03006504
$R_{s,4}$	**5,06762E-06**	0,03157301
$R_{s,3}$	**4,83662E-06**	0,03308097
$R_{s,2}$	**4,62576E-06**	0,03458894
$R_{s,1}$	**4,43251E-06**	0,0360969

Πίνακας 3-5: Υπολογισμός $R_{s,i}$

3.1.5 Υπολογισμός ωμικής αντίστασης σκυροδέματος

Η ωμική αντίσταση του σκυροδέματος $R_{c,i}$ κάθε τμήματος, προσεγγίζεται θεωρώντας το ζεύγος των ομοαξονικών κωνικών τμημάτων σκυροδέματος όπως στο Σχήμα 3-3 (α), ως δύο

ομοαξονικούς κυλίνδρους σκυροδέματος όπως στο Σχήμα 3-3 (β). Το διάκενο ανάμεσα στους κυλίνδρους αυτούς δημιουργείται από την αφαίρεση του πλέγματος χάλυβα. Τομή των κυλίνδρων αυτών φαίνεται στο Σχήμα 3-3 (γ). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η προσέγγιση δεν είναι ακριβής καθώς ενώ υπάρχει διάκενο ανάμεσα στους δύο κυλίνδρους η επιφάνεια της τομής που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό την ωμικής αντίστασης θεωρείται ενιαία και όχι ως δύο παράλληλα συνδεδεμένες ωμικές αντιστάσεις, μία για κάθε κύλινδρο. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να γίνει αποδεκτή γιατί ανάμεσα στις ράβδους του χαλύβδινου πλέγματος σκυροδέματος υπάρχει σκυρόδεμα.

(α) (β) (γ)

Σχήμα 3-3: Προσέγγιση σκυροδέματος

Η μέση επιφάνεια του σκυροδέματος $S_{c,i}$ σε κάθε κωνικό τμήμα μπορεί να προσεγγισθεί από την επιφάνεια του κύκλου με ακτίνα r_i, μείον την επιφάνεια του κύκλου του εσωτερικού κεντρικού διακένου με ακτίνα $r_i - d_c$, μείον το διάκενο επιφάνειας $S_{s,i}$ που καταλαμβάνει το χαλύβδινο πλέγμα, από την εξίσωση:

$$S_{c,i} = \pi \cdot r_i^2 - \pi \cdot (r_i - d)^2 - S_{s,i} \tag{24}$$

Ο υπολογισμός της ωμικής αντίστασης του σκυροδέματος $R_{c,i}$ κάθε ενός από τα 14 τμήματα δίνεται από την εξίσωση:

$$R_{c,i} = \rho_c \frac{h_i}{S_{c,i}} \tag{25}$$

Όπου:

- ρ_c: η ειδική αντίσταση του σκυροδέματος, με $\rho_c = 100\ \Omega \cdot \mathrm{m}$ Η
- h_i: το ύψος του κάθε κωνικού τμήματος, με $h_1 = h_2 = \cdots = h_{12} = 1\ \mathrm{m}$.
- $S_{c,i}$: η μέση επιφάνεια του σκυροδέματος σε κάθε κωνικό τμήμα.

Για $S_{s,i}$ όπως στον Πίνακας 3-5 και τις εξισώσεις (24) και (25), έχουμε:

	$R_{c,i}$ (Ω)	$S_{c,i}$ (m²)
$R_{c,14}$	**6063,045451**	0,01649336
$R_{c,13}$	**5555,146356**	0,01800133
$R_{c,12}$	**5125,763063**	0,01950929
$R_{c,11}$	**4757,995309**	0,02101725
$R_{c,10}$	**4439,468427**	0,02252522
$R_{c,9}$	**4160,913545**	0,02403318
$R_{c,8}$	**3915,250753**	0,02554115
$R_{c,7}$	**3696,978934**	0,02704911

$R_{c,6}$	**3501,758924**	0,02855708
$R_{c,5}$	**3326,122113**	0,03006504
$R_{c,4}$	**3167,262549**	0,03157301
$R_{c,3}$	**3022,885909**	0,03308097
$R_{c,2}$	**2891,097967**	0,03458894
$R_{c,1}$	**2770,321029**	0,0360969

Πίνακας 3-6: Υπολογισμός $R_{c,i}$

3.1.6 Υπολογισμός χωρητικότητας τμημάτων στύλου και εδάφους

Κάθε ένα από τα 14 κωνικά τμήματα δημιουργεί μια χωρητικότητα C_i ανάμεσα στο τμήμα και στο έδαφος. Η χωρητικότητα αυτή δίνεται από την εξίσωση:

$$C_i = \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot h_{t,i}}{\ln\left(\frac{2\pi \cdot h_{t,i}}{r_i}\right)} \tag{26}$$

Όπου:

- ε: η διηλεκτρική σταθερά του κενού (περίπου ίση με του αέρα), με $\varepsilon = 8.85 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{C^2/N \cdot m^2}$,
- $h_{t,i}$: το μέσο ύψος που βρίσκεται κάθε κωνικό τμήμα, με $h_{t,14} = 14\ \mathrm{m}$, $h_{t,13} = 13\ \mathrm{m}, \cdots, h_{t,1} = 1\ \mathrm{m}$, και
- r_i: η μέση ακτίνα του κάθε κωνικού τμήματος.

Για r_i όπως στον Πίνακας 3-2 και την εξίσωση (26), έχουμε:

	C_i (F)	r_i (m)	$h_{t,i}$ (m)
C_{14}	**1,46499E-10**	0,1375	14
C_{13}	**1,39462E-10**	0,1455	13
C_{i12}	**1,32138E-10**	0,1535	12
C_{11}	**1,24523E-10**	0,1615	11
C_{10}	**1,16612E-10**	0,1695	10
C_9	**1,08392E-10**	0,1775	9
C_8	**9,98478E-11**	0,1855	8
C_7	**9,09532E-11**	0,1935	7
C_6	**8,16732E-11**	0,2015	6
C_5	**7,19566E-11**	0,2095	5
C_4	**6,17269E-11**	0,2175	4
C_3	**5,08638E-11**	0,2255	3
C_2	**3,9165E-11**	0,2335	2
C_1	**2,63153E-11**	0,2415	1

Πίνακας 3-7: Υπολογισμός C_i

3.2 Αγωγοί εναερίων γραμμών μεταφοράς μέσης τάσης

3.2.1 Γενικά για τους αγωγούς στις εναέριες γραμμές μέσης μεταφοράς

Οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται συνήθως δεν έχουν μόνωση και κατασκευάζονται από χαλκό (Cu), αλουμίνιο (Al) ή αλουμίνιο-χάλυβα. Σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται αγωγοί από άλλα υλικά και κράματα (π.χ. από γαλβανισμένο χάλυβα, φωσφορούχο

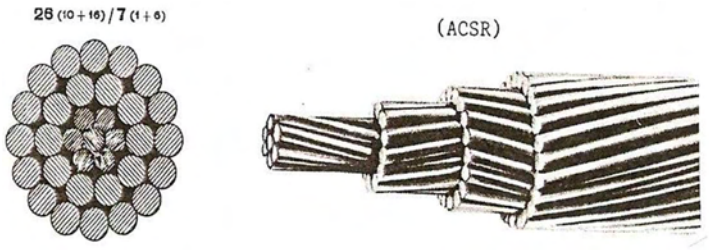
ορείχαλκο κλπ.). Η πλέον διαδεδομένη επιλογή είναι οι αγωγοί αγωγοί αλουμινίου-χάλυβα Al/St, ή **αγωγοί ACSR**.

3.2.2 Εναέριοι αγωγοί αλουμινίου με χαλύβδινη ψυχή (ACSR)

Οι αγωγοί ACSR (Aluminum Coated Steel Reinforced Conductors) ή αγωγοί αλουμινίου με χαλύβδινη ψυχή εμφανίζουν περίπου 50% μεγαλύτερη αντοχή από τους αγωγούς χαλκού και είναι 20% ελαφρύτεροι για ισοδύναμη διατομή με το χαλκό. Η μηχανική τους αντοχή τους καθιστά καταλληλότερους για γραμμές υψηλής και μέσης τάσης όπου οι αποστάσεις ανάμεσα στις θέσεις στήριξης (στύλοι) είναι μεγάλες.

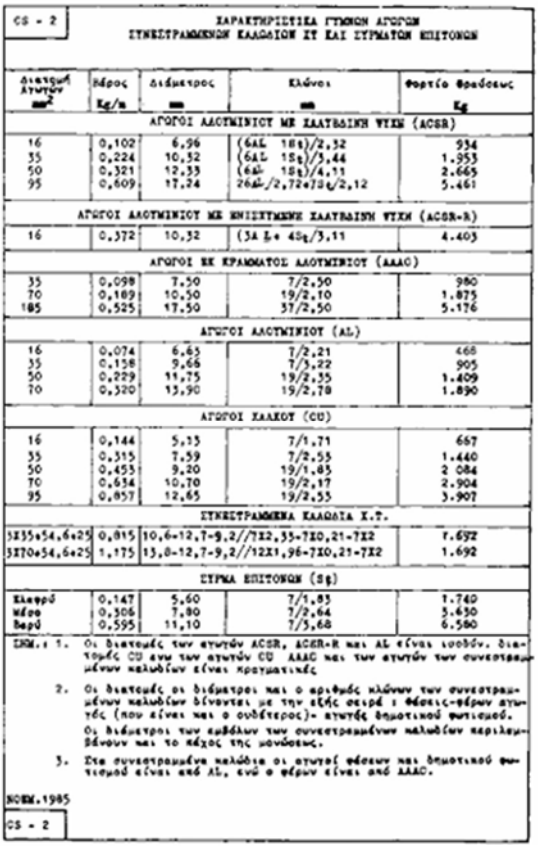
Οι αγωγοί ACSR χαρακτηρίζονται από το λόγο Al/St (επιφάνεια διατομής αλουμινίου/ επιφάνεια διατομής χάλυβα) π.χ. Al/St 185/32 σημαίνει αγωγός με επιφάνεια διατομής 185 mm^2 Al και 32 mm^2 St). Σε σύνθετους αγωγούς η σχέση των επιφανειών διατομών Al/St είναι συνήθως ίση με 6, ενώ σε μεγάλες διατομές μπορεί να φτάσει και το 20.

Οι πολύκλωνοι ACSR αγωγοί αποτελούνται από 1 έως 3 στρώματα χαλύβδινων συρμάτων και 1 έως 3 στρώματα συρμάτων αλουμινίου. Τα σύρματα είναι συνεστραμμένα και προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη συνοχή του συρματόσχοινου. Για τον ίδιο λόγο η διεύθυνση συστροφής είναι αντίθετη σε δυο γειτονικά στρώματα.



Σχήμα 3-4: Μορφή αγωγών Αλουμινίου – Χάλυβα (ACSR) από (ΔΕΔΔΗΕ, 1974-2018).

Στη σελίδα 43(CS-2) του (ΔΕΔΔΗΕ, 1974-2018) δίνεται η ισοδύναμη διατομή χαλκού των αγωγών ACSR, δηλαδή η διατομή που θα είχε ένας αγωγός ίσης αντίστασης, αν κατασκευαζόταν από χαλκό.



CS - 2

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΥΜΝΩΝ ΑΓΩΓΩΝ
ΣΥΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΣΤ ΚΑΙ ΣΥΡΜΑΤΩΝ ΚΗΠΤΟΝΩΝ

Διατομή Αγωγού mm²	Βάρος Kg/km	Διάμετρος mm	Κλώνοι mm	Φορτίο θραύσεως Kg
ΑΓΩΓΟΙ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΧΑΛΥΒΔΙΝΗ ΨΥΧΗ (ACSR)				
16	0,102	6,96	(6AL 1St)/2,32	534
35	0,224	10,32	(6AL 1St)/3,44	1.955
50	0,321	12,35	(6AL 1St)/4,11	2.665
95	0,609	17,24	26AL/2,72+7St/2,12	5.461
ΑΓΩΓΟΙ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗ ΧΑΛΥΒΔΙΝΗ ΨΥΧΗ (ACSR-R)				
16	0,372	10,32	(3A L+ 4St/3,11	4.403
ΑΓΩΓΟΙ ΕΚ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ (AAAC)				
35	0,098	7,50	7/2,50	980
70	0,189	10,50	19/2,10	1.875
185	0,525	17,50	37/2,50	5.176
ΑΓΩΓΟΙ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ (AL)				
16	0,074	6,63	7/2,21	466
35	0,158	9,66	7/3,22	905
50	0,229	11,75	19/2,55	1.409
70	0,320	13,90	19/2,78	1.890
ΑΓΩΓΟΙ ΧΑΛΚΟΥ (CU)				
16	0,144	5,13	7/1,71	667
35	0,315	7,59	7/2,55	1.440
50	0,455	9,20	19/1,85	2 084
70	0,634	10,70	19/2,17	2.904
95	0,857	12,65	19/2,55	3.907
ΣΥΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΑ ΚΑΛΩΔΙΑ Χ.Τ.				
3X35+54,6+2S	0,815	10,6-12,7-9,2//7X2,55-7X0,21-7X2		1.692
3X70+54,6+2S	1,175	13,8-12,7-9,2//12X1,96-7X0,21-7X2		1.692
ΣΥΡΜΑ ΚΗΠΤΟΝΩΝ (Sp)				
Ελαφρύ	0,147	5,60	7/1,85	1.740
Μέσο	0,306	7,80	7/2,64	3.630
Βαρύ	0,595	11,10	7/3,68	6.560

ΣΗΜ.: 1. Οι διατομές των αγωγών ACSR, ACER-R και AL είναι ισοδύν. διατομές CU ενώ των αγωγών CU AAAC και των αγωγών των συνεστραμμένων καλωδίων είναι πραγματικές

2. Οι διατομές οι διάμετροι και ο αριθμός κλώνων των συνεστραμμένων καλωδίων δίνονται με την εξής σειρά : Φάσεις-φέρων αγωγός (που είναι και ο ουδέτερος)- αγωγός δημοτικού φωτισμού.
Οι διάμετροι των εμβάλων των συνεστραμμένων καλωδίων περιλαμβάνουν και το πάχος της μονώσεως.

3. Στα συνεστραμμένα καλώδια οι αγωγοί φάσεων και δημοτικού φωτισμού είναι από AL, ενώ ο φέρων είναι από AAAC.

NOEM.1985

CS - 2

Σχήμα 3-5: Χαρακτηριστικά αγωγών εναέριων γραμμών, σελίδα CS-2 (ΔΕΔΔΗΕ, 1974-2018).

3.2.3 Επιλογή αγωγών μεταφοράς

Η πλέον κοινή επιλογή αγωγών στα δίκτυα μέση τάσης είναι οι αγωγοί ACSR 35, δηλαδή αγωγοί που αποτελούνται από κλώνους αλουμινίου με χαλύβδινη ψυχή. Οι αγωγοί αυτοί χρησιμοποιούνται κυρίως σε αγροτικές περιοχές. Αυτοί είναι οι κύριοι λόγοι που επιλέχθηκε να μελετηθεί ο αγωγός ACSR 35.

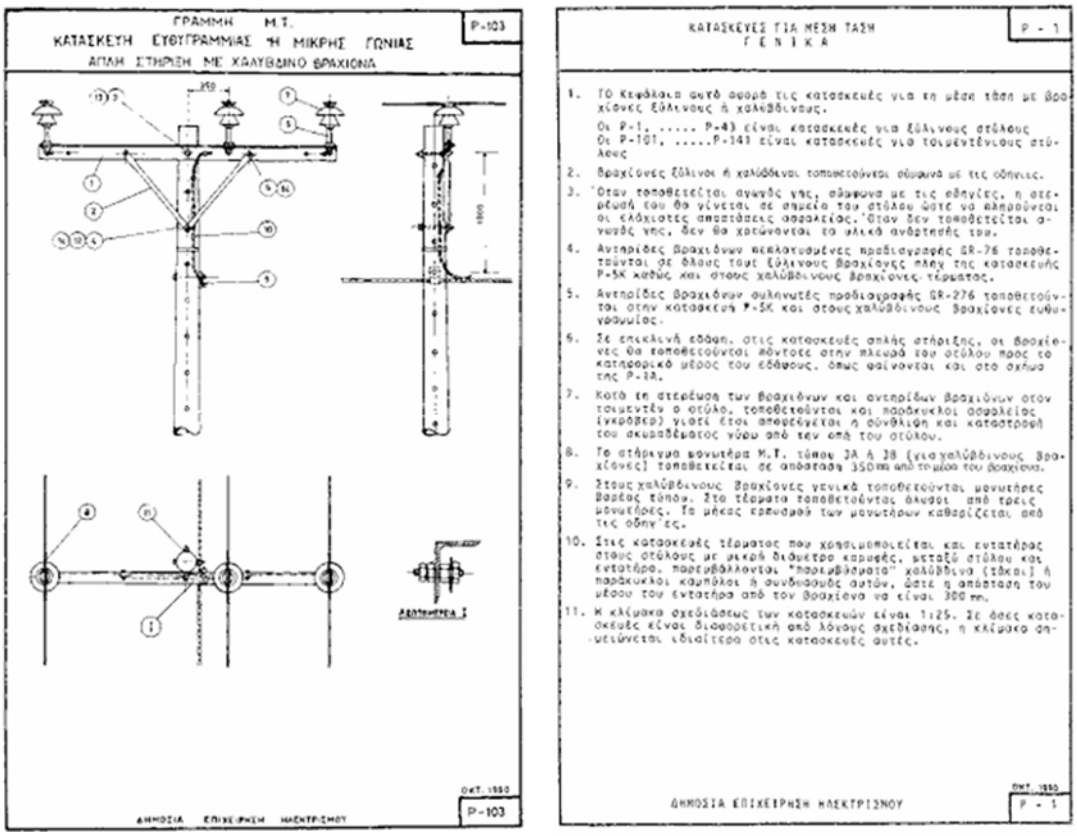
Οι αγωγοί ACSR 35, εμφανίζουν ωμική αντίσταση ισοδύναμη με αυτή αγωγών χαλκού επιφάνειας διατομής 35 mm^2. Στην πραγματικότητα οι αγωγοί ACSR 35 αποτελούνται από 6 εξωτερικούς κλώνους αγωγών αλουμινίου και έναν κεντρικό κλώνο χάλυβα. Η πραγματική τους επιφάνειας διατομής είναι 65 mm^2, με 59 mm^2 για το αλουμίνιο και 9 mm^2 για το χάλυβα από όπου προκύπτει και ο λόγος 59/9. Οι αγωγοί αυτοί εμφανίζουν ωμική αντίσταση R με τιμή 0,576 Ω/km και επαγωγική αντίσταση ωL με τιμή 0,397 Ω/km. Η διάμετρος των αγωγών ACSR 35 είναι 10,32mm (σελίδα CS-2 (ΔΕΔΔΗΕ, 1974-2018)).

Άρα η ακτίνα των αγωγών ACSR 35 είναι: $r = 5{,}16\ mm$.

3.2.4 Επιλογή διάταξης αγωγών μεταφοράς – Υπολογισμός αποστάσεων αγωγών

Μετά από παρατήρηση των υφιστάμενων δικτύων μέσης τάσης, διαπιστώθηκε ότι στην πλειονότητά τους τα δίκτυα μέσης τάσης αναπτύσσονται κατά την διάταξη που περιγράφεται ως “Γραμμή Μ.Τ. Κατασκευή Ευθυγραμμίας ή Μικρής Γωνίας”, στη σελίδα P-103 του (ΔΕΔΔΗΕ, 1974-2018) (Σχήμα 3-6 (α)). Υποθέτουμε ότι αυτή η διαδεδομένη διάταξη, επιλέγεται γιατί διατηρεί και τους τρεις αγωγούς του δικτύου στη μέγιστη απόσταση από το έδαφος, αξιοποιώντας πλήρως το ύψος του στύλου (η κάθετη διάταξη θα έφερνε δύο αγωγούς πλησιέστερα προς το έδαφος).

Όμως σε αυτή την κατασκευαστική διάταξη, οι θέσεις των τριών αγωγών πάνω στον οριζόντιο βραχίονα που είναι συμμετρικά τοποθετημένος κοντά στην κορυφή του στύλου, παρουσιάζουν οριζόντια ασυμμετρία ως προς τον κατακόρυφο άξονα του στύλου. Οι δύο αγωγοί στηρίζονται (μέσω των μονωτήρων) στα δύο άκρα του οριζόντιου βραχίονα, ενώ η τρίτη βρίσκεται ασύμμετρα τοποθετημένη (μέσω μονωτήρα) πλησιέστερα σε μια από τις δύο ακραίες θέσεις. Υποθέτουμε ότι γίνεται αυτή η επιλογή γιατί η προεξοχή του στύλου εμποδίζει την τοποθέτηση του μεσαίου αγωγού στο μέσο του βραχίονα. Σε άλλες κατασκευαστικές διατάξεις που παρατηρούνται σπανιότερα και μόνο για την περίπτωση ξύλινων στύλων, γίνεται προσθήκη επέκτασης σε ύψος του στύλου, ώστε να στηριχθεί εκεί ο μεσαίος αγωγός. Σε στύλους από οπλισμένο σκυρόδεμα δεν έχουμε τέτοιες επεκτάσεις.

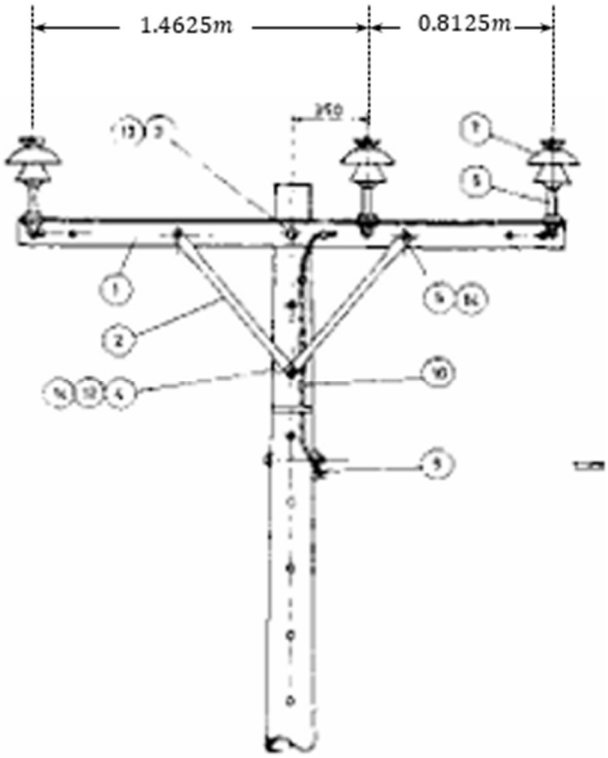


(α) (β)

Σχήμα 3-6 (α) "Γραμμή Μ.Τ. Κατασκευή Ευθυγραμμίας ή Μικρής Γωνίας", σελίδα P-103, (β) Κλίμακα σχεδίαση κατασκευών σελίδα P-1, από το (ΔΕΔΔΗΕ, 1974-2018)

Η σελίδα P-1 του (ΔΕΔΔΗΕ, 1974-2018) στη σημείωση 11 αναφέρεται ότι η κλίμακα σχεδίασης των κατασκευών είναι 1:25 (Σχήμα 3-6 (β)). Συνεπώς μετρώντας με χάρακα τις αποστάσεις ανάμεσα στους αγωγούς (Σχήμα 3-6 (α)), προκύπτει ότι (Σχήμα 3-7):

- Απόσταση αγωγού στα αριστερά από τον μεσαίο αγωγό: $1.4625\ m$
  $(5.85\ cm \times 25 = 1.4625\ m)$
- Απόσταση αγωγού στα δεξιά από τον μεσαίο αγωγό: $0.8125\ m$
  $(3.25\ cm \times 25 = 0.8125\ m)$.



Σχήμα 3-7: Υπολογισμός αποστάσεων αγωγών σε κατασκευή ευθυγραμμίας

3.2.5 Υπολογισμός μέσου ύψους αγωγών - βέλος κάμψης

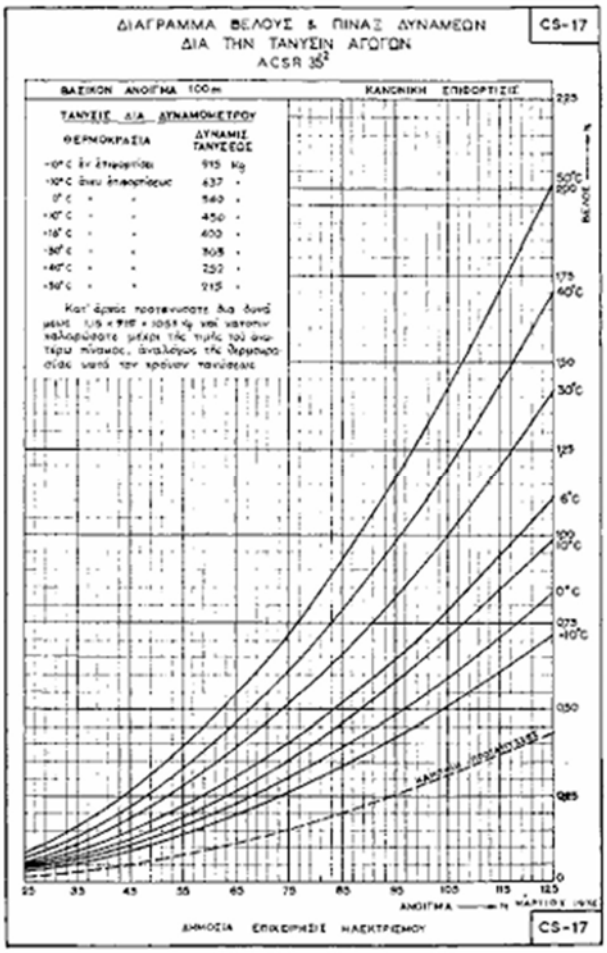
Οι αγωγοί βρίσκονται τοποθετημένοι σε οριζόντια διάταξη κοντά στην κορυφή του στύλου, έστω σε απόσταση 14 m από το έδαφος. Όμως δεν διατηρούν αυτό την απόσταση σε όλο μήκος τους από τον έναν στύλο έως τον επόμενο. Αυτό συμβαίνει γιατί οι αγωγοί έχουν βάρος και επίσης δεν μπορούν να εφαρμοστούν πάνω τους δυνάμεις τάνυσης που θα τους επέτρεπαν να είναι οριζόντιοι σε όλο το μήκος τους γιατί κάτι τέτοιο είναι πιθανό να υπερέβαινε τα όρια θραύσης τους ή και να προκαλούσε άλλα μηχανικά προβλήματα στους στύλους που τους στηρίζουν. Για αυτό και παρατηρείται στα δίκτυα οι αγωγοί να εμφανίζουν καμπυλότητες από το ένα σημείο στήριξης έως το επόμενο.

Άρα, η απόσταση των αγωγών από το έδαφος μεταβάλλεται από την μέγιστη τιμή του (V_{tow}) στα σημεία στερέωσής τους στις κορυφές δύο διαδοχικών στύλων, έως την ελάχιστη τιμή της στο μέσο της απόστασης μεταξύ των δύο στύλων. Η απόσταση αυτή από το έδαφος εξαρτάται και από την απόσταση ανάμεσα στους στύλους η οποία μπορεί να μην είναι σταθερή.

Αν θεωρήσουμε ότι η απόσταση ανάμεσα σε όλα τα ζεύγη διαδοχικών στύλων είναι σταθερή και ίση με 100 m, η μέση απόσταση των αγωγών από το έδαφος (V_{mid}) ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς στύλους μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$V_{mid} = V_{tower} - \frac{2}{3} \times Βέλος\ Κάμψης$$

Το βέλος κάμψης για αγωγούς ACSR 35, σε θερμοκρασία 25° C, μεταξύ στύλων τοποθετημένων σε απόσταση 100 m δίνεται από τη σελίδα CS-17 του (ΔΕΔΔΗΕ, 1974-2018) και είναι ίσο με 1 m.



Σχήμα 3-8 Βέλος κάμψης, σελίδα CS-17 από το (ΔΕΔΔΗΕ, 1974-2018).

Άρα:

$$V_{mid} = V_{tower} - \frac{2}{3} \times Βέλος\ Κάμψης = 14\ m - \frac{2}{3} \times 1\ m = 13{,}33\ m$$

4 Κεφάλαιο: Μοντελοποίηση Κευρανικών Πληγμάτων και Μονωτήρων

Στόχος της εργασίας είναι η προσομοίωση δικτύου μεταφοράς μέσης τάσης και η μελέτη των επιπτώσεων σε αυτό κεραυνικών πληγμάτων. Δύο από τα σημαντικότερα ζητήματα που μας απασχόλησαν ήταν η μελέτη και προσομοίωση των κεραυνικών πληγμάτων και των μονωτήρων. Για αυτό και πριν τη μελέτη της συμπεριφοράς του συνολικού δικτύου έγιναν εκτεταμένες προσομοιώσεις και πειραματισμοί για τη μελέτη των κεραυνικών πληγμάτων και των μονωτήρων. Για τις προσομοιώσεις, τα αποτελέσματα των οποίων φαίνονται στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ATPDraw (παράγραφος 5.1).

4.1 Κεραυνικά Πλήγματα Δοκιμών

Για τους σκοπούς της εργασίας θα πρέπει να καθοριστούν οι παράμετροι των πληγμάτων δοκιμών. Τα κριτήρια επιλογής τους βασίστηκαν στα στατιστικά δεδομένα και τη μελέτη του προτύπου IEC 62305-1. Τα περισσότερο συχνά κεραυνικά πλήγματα είναι τα Κατερχόμενα Αρνητικά (περίπου 90%) τα οποία και συνήθως συμβαίνουν σε σχετικά επίπεδο έδαφος και σε προεξοχές μικρότερες των 60 m. Αυτά τα χαρακτηριστικά εδάφους και προεξοχών είναι αυτά που προσομοιάζουν περισσότερο με τις οδεύσεις δικτύων μέσης τάσης, τα οποία αν και εκτεταμένα σε μήκη συνήθως ακολουθούν επίπεδες διαδρομές. Ακόμα και στις περιπτώσεις που τα δίκτυα πρέπει να διασχίσουν μικρούς λόφους η όδευση αποφεύγει κορυφές. Επιπλέον οι στύλοι που φέρουν τις εναέριες γραμμές έχουν σχετικά χαμηλά ύψη που συνήθως δεν ξεπερνούν τα 15 m. Για τους λόγους αυτούς τα πλήγματα των δοκιμών εστιάζονται σε Κατερχόμενα Αρνητικά πλήγματα.

4.1.1 Ακολουθίες Πληγμάτων

Όπως φαίνεται από τη συζήτηση στην 1.8.1 η πλέον πιθανή ακολουθία Κατερχόμενων Αρνητικών πληγμάτων είναι αυτή του ενός Βραχέως Πρώτου Αρνητικού πλήγματος με πιθανότητα περίπου 45%. Η αμέσως περισσότερο πιθανή ακολουθία Αρνητικών πληγμάτων είναι αυτή του ενός Βραχέως Πρώτου Αρνητικού ακολουθούμενο από δύο ή τρία Βραχέα Ακόλουθα Αρνητικά. Για αυτές τις δύο κατηγορίες ακολουθιών δημιουργούνται δύο κατηγορίες δοκιμών:

- K1: μόνο Πρώτο Κατερχόμενο Αρνητικό πλήγμα
- K2: Πρώτο Κατερχόμενο Αρνητικό ακολουθούμενο από δύο Ακόλουθα.

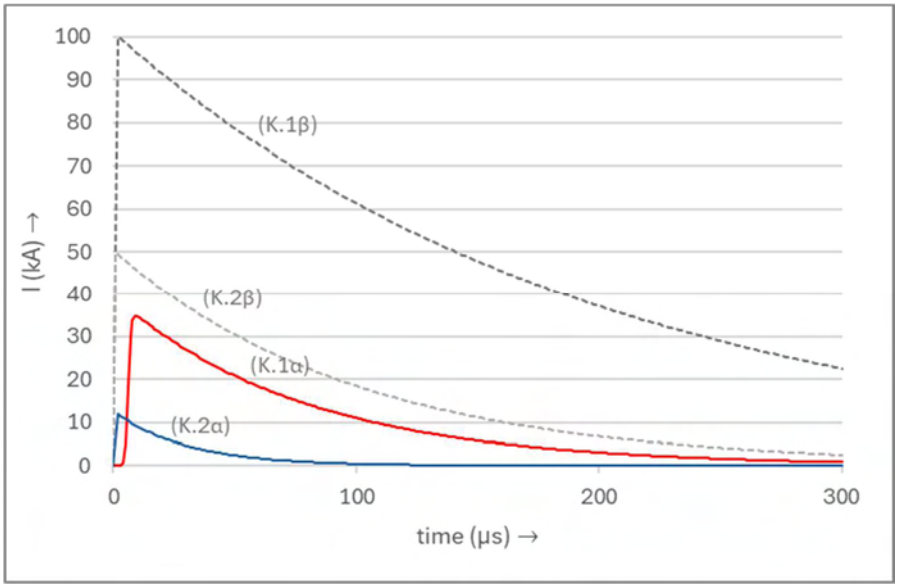
4.1.2 Παράμετροι πληγμάτων δοκιμών

Οι κάθε μια από αυτές τις δύο κατηγορίες χωρίζονται περαιτέρω σε δύο, από τις οποίες για την πρώτη (α) έχουν χρησιμοποιηθεί με στρογγυλοποίηση οι μέσες τιμές των στατιστικών δεδομένων (Παράγραφος 1.8.4), ενώ για τη δεύτερη τα δεδομένα για το Πρώτο Επίπεδο Προστασίας (LPL-I) όπως στην παράγραφο 1.7. Έτσι, δημιουργούνται τέσσερεις κατηγορίες δοκιμών.

Πίνακας 4-1 Παράμετροι πληγμάτων Δοκιμών Κ.1α, Κ.2α, Κ.1β και Κ.2β

Δοκιμές (Κ)			**Κ.1α**	**Κ.1β**	**Κ.2α**	**Κ.2β**
Πρώτο Αρνητικό (-)						
Ρεύμα Κορυφής	I_{max}	(kA)	35	100	35	100
Χρόνος Μετώπου / Ουράς	T_1/T_2	(μs)/(μs)	6/78	1/200	6/78	1/200
Μεσοδιάστημα						
Διάρκεια Μεσοδιαστήματος	T_D	(ms)			32	
Πρώτο Ακόλουθο Αρνητικό (-)						
Ρεύμα Κορυφής	I_{max}	(kA)			12	50
Χρόνος Μετώπου / Ουράς	T_1/T_2	(μs)/(μs)			1/30	0.25/100
Μεσοδιάστημα						
Διάρκεια Μεσοδιαστήματος	T_D	(ms)			32	
Δεύτερο Δευτερογενές Αρνητικό (-)						
Ρεύμα Κορυφής	I_{max}	(kA)			12	50
Χρόνος Μετώπου / Ουράς	T_1/T_2	(μs)/(μs)			1/30	0.25/100

Για τη δημιουργία των Δοκιμών Κ.1α και Κ.2α έχουν χρησιμοποιηθεί με στρογγυλοποίηση οι μέσες τιμές των στατιστικών δεδομένων (Παράγραφος 1.8.4), ενώ για τη δημιουργία των Δοκιμών Κ.1β και Κ2.β έχουν χρησιμοποιηθεί τα δεδομένα για το Πρώτο Επίπεδο Προστασίας (LPL-I) όπως στην παράγραφο 1.7 (για την Κ.2β ελλείψει τιμών για το μεσοδιάστημα έχουν χρησιμοποιηθεί οι τιμές από τα στατιστικά στοιχεία).

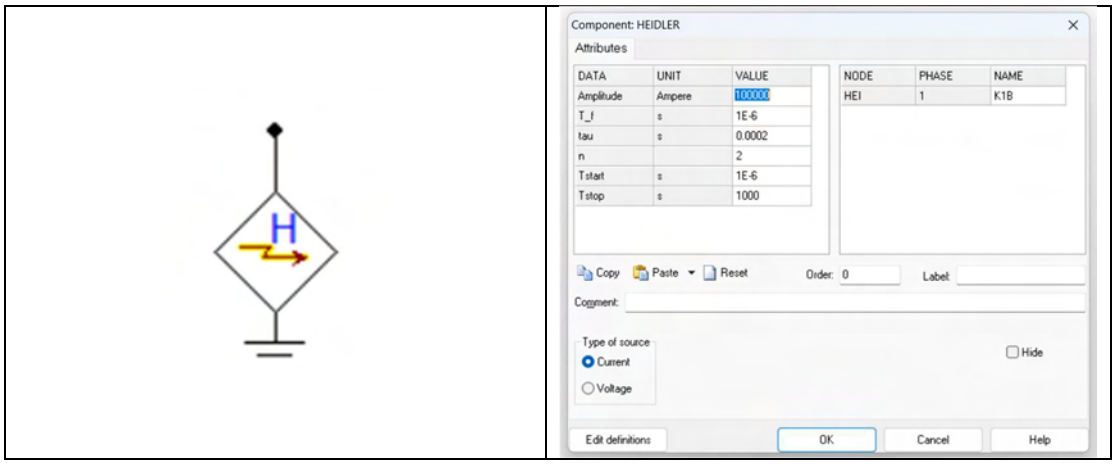


Σχήμα 4-1 Απεικόνιση κρουστικής συνάρτησης Heidler για τις Δοκιμές Ακόλουθων Πληγμάτων, (Κ.1α): κόκκινη γραμμή, (Κ.1β): μαύρη διακεκομμένη, (Κ.2α): μπλε γραμμή, (Κ.2β): γκρι διακεκομμένη (δημιουργήθηκε με excel).

Για την παραγωγή των γραφικών απεικονίσεων όπως στο Σχήμα 4-1 χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση Heidler με παραμέτρους (Κ.1α) $I_{max} = 35$ kA, $T_1 = 6$ μs , $T_2 = 78$ μs, $\eta_h = 10$, (Κ.1β) $I_{max} = 100$ kA, $T_1 = 1$ μs , $T_2 = 200$ μs, $\eta_h = 10$, (Κ2.α) $I_{max} = 12$ kA, $T_1 = 1$ μs , $T_2 = 30$ μs, $\eta_h = 10$ και (Κ2.β) $I_{max} = 50$ kA, $T_1 = 0.25$ μs , $T_2 = 100$ μs, $\eta_h = 10$.

4.2 Προσομοίωση κεραυνικού πλήγματος στο ATP EMPT

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες προσεγγίσεις για την προσομοίωση κεραυνικών πληγμάτων (Τοπάλογλου, 2018) (Τσακούμης, 2023) (Ametani & Kawamura, 2005) (Cabral, et al., 2012). Η πλέον συνήθης προσομοίωση είναι με χρήση του στοιχείου Heidler type 15.



Σχήμα 4-2 Στοιχείο Heidler type 15

Κατά τις πρώτες δοκιμές παρατηρήθηκαν διαφορές στις καμπύλες που παράγονταν με τη χρήση του στοιχείου Heidler type 15 στο ATP EMPT και για τις θεωρητικά υπολογιζόμενες για τις ίδιες τιμές των παραμέτρων της εξίσωσης Heidler (3) για τα Κ1.α, Κ1.β, Κ2.α και Κ2.β όπως στο Σχήμα 4-1. Αναζητώντας το πρόβλημα με χρήση των επεξηγήσεων που παρέχονται στο Help του στοιχείου Heidler type 15 του ATP EMTP διαπιστώθηκαν τα εξής:

Πίνακας 4-2 Διαφορές παραμέτρων και εξίσωσης Heidler και των παραμέτρων του στοιχείου Heidler type 15

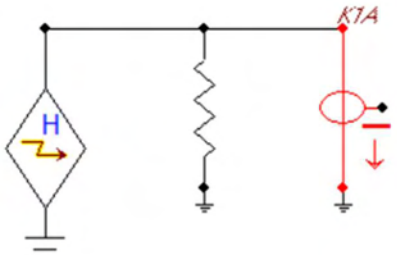
Παράμετροι	Εξίσωση Heidler (3)	Heidler type 15	Σημείωση από την περιγραφή του στοιχείου
Ρεύμα κορυφής	I_{max}	Amp	Αναφέρεται ότι δεν αποτελεί το ρεύμα κορυφής
Διάρκεια Μετώπου	T_1	T_f	
Διάρκεια Ημίσεως Απόσβεσης	T_2	tau	Χρονικό διάστημα στο οποίο η συνάρτηση φτάνει στο 37% του ρεύματος κορυφής
Συντελεστής κλιμάκωσης Heilder	n_h	n	

- Η παράμετρος Amp του στοιχείου Heidler type 15 δεν αντιστοιχεί στο ρεύμα κορυφής χωρίς να αναφέρεται με σαφήνεια ο ορισμός της.
- Η παράμετρος tau δεν αντιστοιχεί στον χρόνο ημίσεως απόσβεσης αλλά στο χρόνο που τιμή του ρεύματος φτάνει στο 37% του ρεύματος κορυφής.
- Η εξίσωση που χρησιμοποιεί το στοιχείο Heidler type 15 διαφέρει από την εξίσωση Heidler όπως στην (3) στο ότι δεν περιλαμβάνει στον παρανομαστή τον συντελεστή n_h.

Καθώς δεν είναι δυνατή η τροποποίηση του κώδικα που υλοποιεί το στοιχείο Heidler type 15 πραγματοποιήθηκαν διάφορες δοκιμές ώστε να βρεθούν κατάλληλες τιμές για την παράμετρο n για τις οποίες η παράμετρος Amp θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι ταυτίζεται με

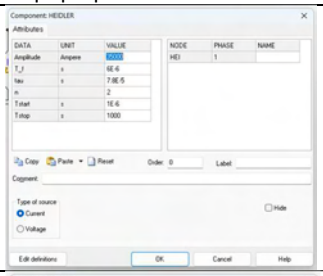
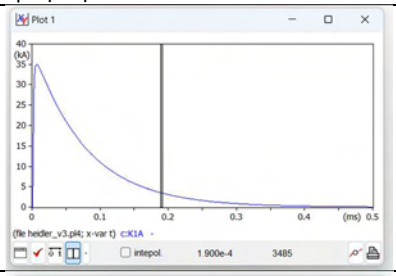
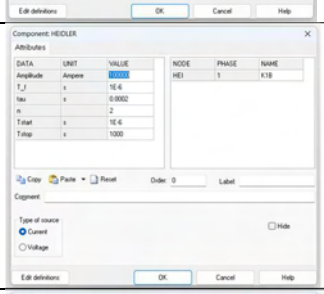
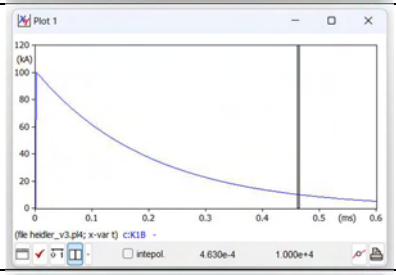
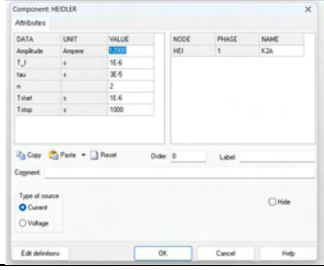
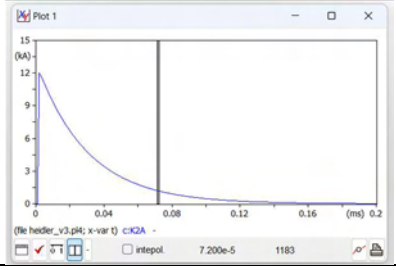
το ρεύμα κορυφής και οι παραγόμενες καμπύλες να αντιστοιχούν στις θεωρητικά υπολογιζόμενες όπως στο Σχήμα 4-1. Οι δοκιμές κατέληξαν στη χρήση της τιμής n=2.

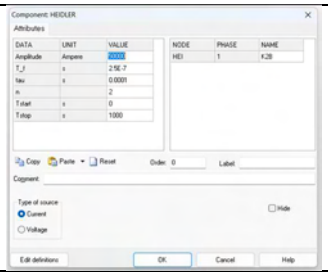
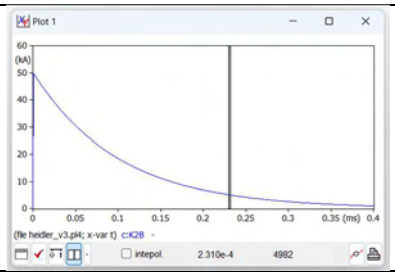
Σε άλλες εργασίες προσομοίωσης κεραυανικών πληγμάτων (Ametani & Kawamura, 2005) (Cabral, et al., 2012) αναφέρεται ότι για να μοντελοποιηθεί η εμπέδηση του καναλιού διάδοσης του Οχετού χρησιμοποιείται ωμική αντίσταση παράλληλα με την κρουστική πηγή ρεύματος του στοιχείου Heidler type 15. Η τιμή της ωμικής αντίστασης αναφέρεται ίση με 400 Ω (Cabral, et al., 2012) αν και έχουν προταθεί και τιμές 1-2 kΩ ως καταλληλότερες (Ametani & Kawamura, 2005).



Με βάση αυτό το μοντέλο προσομοίωσης των κεραυνικών πληγμάτων μετρήθηκαν στο ATP οι χρόνοι (t_{10}) που τα Πρώτα και Ακόλουθα πλήγματα και των τεσσάρων περιπτώσεων εμφανίζουν ρεύματα κάτω από 10% του ρεύματος κορυφής. Αυτές οι χρονικές στιγμές (t_{10}) θεωρήθηκαν ότι είναι οι χρόνοι κατά τους οποίους έχουν ολοκληρωθεί τα πλήγματα. Άλλωστε τα μεσοδιαστήματα των 32 ms είναι ικανό διάστημα ώστε να θεωρηθεί ότι έχει επέλθει η ολοκλήρωσή του πλήγματος.

Πίνακας 4-3 Μετρήσεις χρόνων t_{10} ρευμάτων κάτω από 10% του ρεύματος κορυφής

Πλήγμα	Παράμετροι	Γραφική	t_{10} (s)
K1.α -Πρώτο			1.9 E-4
K1.β -Πρώτο			4.63E-4
K1.α -Ακόλουθα			7.2 E-5

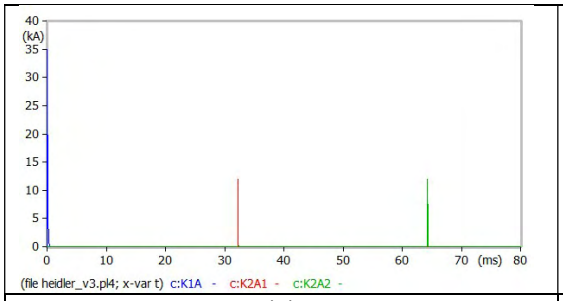
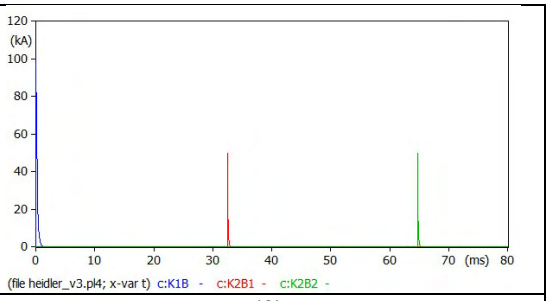
K1.β - Ακόλουθα			2.31 E-4

Με αυτές τις μετρήσεις για τα t_{10} από τον Πίνακας 4-3 μπορούν να υπολογισθούν οι χρόνοι έναρξης των t_{start} των δύο διαδοχικών ακόλουθων πλημμάτων, συνυπολογίζοντας και τα μεσοδιαστήματα όπως στον Πίνακας 4-1. Άρα για τα πλήγματα Κ2.α και Κ2.β όπου υπάρχουν Ακόλουθα πλήγματα οι χρόνοι έναρξής τους t_{start} θα είναι:

Πίνακας 4-4 Χρόνοι έναρξης Ακόλουθων πλημμάτων δοκιμών Κ2.α και Κ2.β

Κ2.α		t_{start} (ms)
Έναρξη Πρώτου Ακόλουθου	0.19 E-3 + 32 E-3	32.19
Έναρξη Δεύτερου Ακόλουθου	32.19 E-3 + 0.072 E-3 + 32 E-3	64.262
Κ2.β		
Έναρξη Πρώτου Ακόλουθου	0.463E-3+ 32 E-3	32.463
Έναρξη Δεύτερου Ακόλουθου	32.463 E-3 + 0.231 E-3+ 32 E-3	64.694

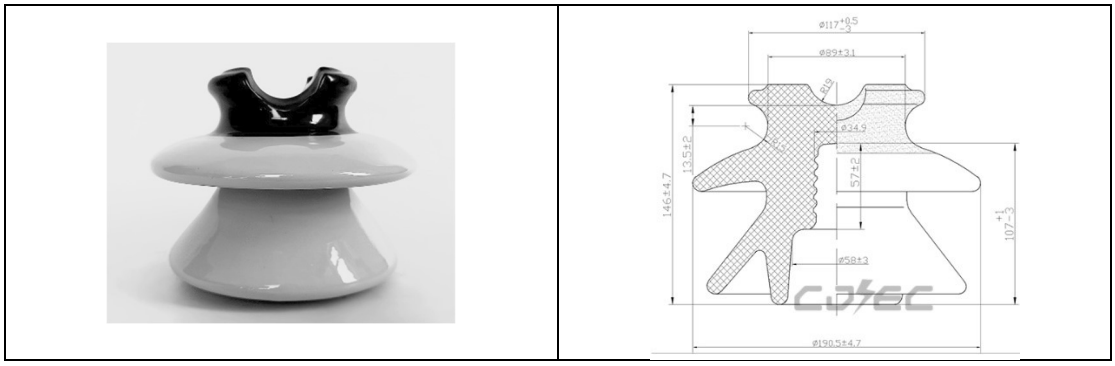
Θέτοντας αυτούς τους χρόνους έναρξης η μορφή της ακολουθίας ενός πρώτου και δύο ακόλουθων πλημμάτων θα είναι όπως στο Σχήμα 4-3 για τις δοκιμές Κ2.α και Κ2.β.

	
(α)	(β)

Σχήμα 4-3 Ακολουθία Πλημμάτων (α) Κ2.α και (β) Κ2.β

4.3 Μονωτήρες Δοκιμών

Στα δίκτυα μέσης τάσης οι πλέον διαδεδομένοι μονωτήρες είναι οι μονωτήρες τύπου κώδωνα πορσελάνης. Από παρατήρηση των εγκατεστημένων στο δίκτυο μονωτήρων διαπιστώνεται ότι στην πλειοψηφία τους είναι αυτοί που ακολουθούν το πρότυπο ANSI 56-1 όπως αυτός που φαίνεται στην Εικόνα 4-1. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το χρώμα της επίστρωσης των εγκατεστημένων μονωτήρων στα δίκτυα μέσης τάσης στην Ελλάδα είναι συνήθως σκούρο καφέ και διαφορετικό από αυτό της εικόνας, αλλά τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά είναι τα ίδια (ANSI 56-1).



Εικόνα 4-1 Μονωτήρα τύπου κώδωνα με ακίδα κατά το πρότυπο ANSI 56-1, από https://www.johnsoninsulator.com/23kv-11kn-ansi-56-1-high-voltage-pin-type-porcelain-insulator-product/

Υπάρχει πληθώρα κατασκευαστών τέτοιων μονωτήρων κυρίως στην Ασία που παράγουν διαφορετικές διαμορφώσεις στις κυματώσεις των επιφανειών, αλλά όλοι αναφέρουν ότι συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις του προτύπου για βασικά μηχανικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Ανάμεσα στα τεχνικά χαρακτηριστικά αναφέρονται τα:

Διαστάσεις:

- Διάμετρος (Diameter): 191 mm
- Ύψος (Height): 146 mm
- Μήκος ερπυσμού (Creepage distance): 330 mm
- Απόσταση ξηρού τόξου (Dry arcing distance): 175 mm
- Ελάχιστο ύψος ακίδας (Minimum pin height): 152 mm

Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά:

- Τυπική τάση εφαρμογής (Type application voltage): 23 kV
- Τάση υπερπήδησης, υπό ξηρασία σε χαμηλές συχνότητες (Low frequency dry flashover voltage): 95 kV
- Τάση υπερπήδησης, υπό υγρασία σε χαμηλές συχνότητες (Low frequency wet flashover voltage): 60 kV
- Κρίσιμη τάση υπερπήδησης, θετική κρουστική (Critical impulse flashover voltage, positive): 150 kV
- Κρίσιμη τάση υπερπήδησης, αρνητική κρουστική (Critical impulse flashover voltage, negative): 190 kV
- Τάση διάτρησης σε χαμηλές συχνότητες (Low frequency puncture voltage): 130 kV

4.4 Προσομοίωση Μονωτήρων στο ATP-EMTP

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες υλοποιήσεις προσομοίωσης των μονωτήρων. Η πλέον ολοκληρωμένη που καλύπτει το σύνολο των μεθόδων που αναφέρθηκαν στην 2.3 είναι αυτή που αναφέρεται στα (Datsios, et al., 2011) (Datsios & Mikropoulos, 2014). Η υλοποίηση αυτή, ως αντικείμενο που ονομάζεται ISF (Insulator String Flashover) για το ATPDraw, είναι διαθέσιμη από το (Laboratory, 2011) https://hvl.ee.auth.gr/en/software-2/ και https://hvl.ee.auth.gr/wp-content/uploads/2018/01/ISF_object.zip .

4.4.1 Προσομοίωση με χρήση Καμπύλης Τάσης-Χρόνου

Στις εργασίες των (Τοπάλογλου, 2018) (Παναγόπουλος-Χασσούντ, 2018) (Τσακούμης, 2023) αναφέρονται πειραματικά δεδομένα μετρήσεων για μονωτήρα τύπου κώδωνα μήκους (ύψους) 0.20 m, όπως στον πίνακα στο Σχήμα 4-4. Δεν είναι γνωστό αν αυτός ο μονωτήρας ακολουθεί κάποιο από τα πρότυπα αλλά μάλλον πρόκειται για μονωτήρα τύπου ANSI 56-2 καθώς για αυτούς τους μονωτήρες αναφέρεται απόσταση ξηρού τόξου (dry arcing distance) 191 mm. Οι εργασίες των (Τοπάλογλου, 2018) (Παναγόπουλος-Χασσούντ, 2018) (Τσακούμης, 2023) καταλήγουν στην συνάρτηση τάσης-χρόνου όπως στην (27)

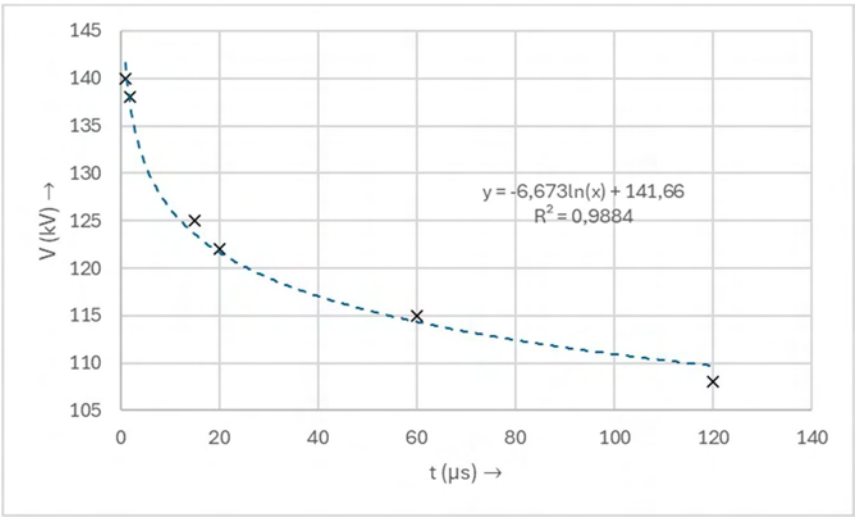
$$U(t) = 109.823 + 30.8764 \cdot e^{t/22.8064} \quad (27)$$

Όπου,

- $U(t)$: τάση στα άκρα του μονωτήρα, (kV)
- t: χρόνος, (μs)

Στα ίδια δεδομένα έγινε λογαριθμική προσαρμογή καμπύλης με χρήση του Excel και προέκυψε η καμπύλη που φαίνεται στο Σχήμα 4-4 η οποία εκφράζεται από την εξίσωση (28) με μέσο τετραγωνικό σφάλμα προσαρμογής ίσο με 0.9884.

U (kV)	**t** (μs)
140	1
138	2
125	15
122	20
115	60
108	120



Σχήμα 4-4 Καμπύλη Τάσης-Χρόνου Μονωτήρα (δημιουργήθηκε με excel).

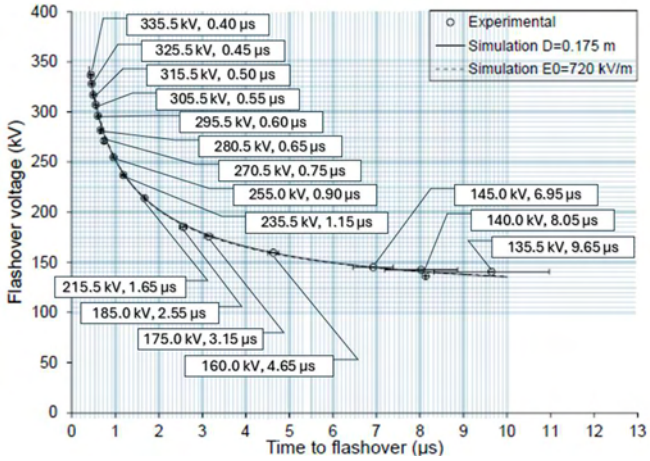
Δοκιμάστηκαν διάφοροι τρόποι προσαρμογής καμπύλης, όπως πολυωνυμική 2ης τάξης και εκθετική προσαρμογή, που εμφάνιζαν μικρότερα ή και μεγαλύτερα μέσα τετραγωνικά σφάλματα προσαρμογής αλλά επιλέχθηκε η λογαριθμική γιατί εμφάνιζε καλύτερη προσαρμογή στην αναμενόμενη καμπύλη.

$$U(t) = -6.673 \cdot \ln(t) + 141.66 \quad (28)$$

Όπου,

- $U(t)$: τάση στα άκρα του μονωτήρα, (kV)
- t: χρόνος, (μs)

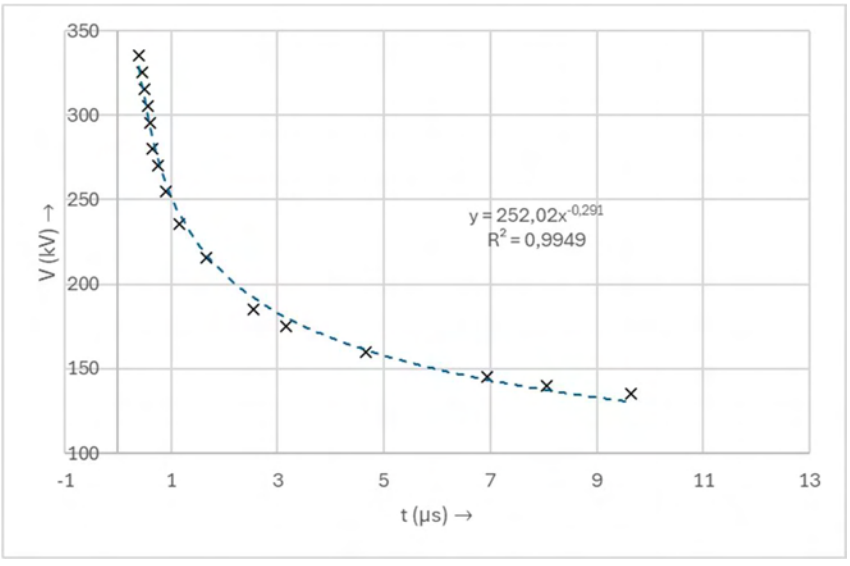
Στο (Mikropoulos & Tsouris, 2022) αναφέρονται πειράματα με μονωτήρα τύπου ANSI 56-1. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών δίνονται σε μορφή καμπύλης τάσης- χρόνου στο Fig.5 του (Mikropoulos & Tsouris, 2022) χωρίς όμως να αναφέρονται τα πρωτογενή δεδομένα. Από αυτό το σχήμα έγινε προσπάθεια να εκτιμηθούν τα πειραματικά δεδομένα. Το αποτέλεσμα αυτών των εκτιμήσεων φαίνεται στο Σχήμα 4-5.



Σχήμα 4-5 Εκτίμηση πειραματικών δεδομένων των δοκιμών από το Fig. 5 (Mikropoulos & Tsouris, 2022), μετά από μετατροπή του Fig.5 (Mikropoulos & Tsouris, 2022).

Στα δεδομένα που εκτιμήθηκαν έγινε εκθετική προσαρμογή καμπύλης με χρήση του Excel και προέκυψε η καμπύλη που φαίνεται στο Σχήμα 4-6 η οποία εκφράζεται από την εξίσωση (29) με μέσο τετραγωνικό σφάλμα προσαρμογής ίσο με 0.9949.

U (kV)	**t** (μs)
335.5	0.40
325.5	0.45
315.5	0.50
305.5	0.55
295.5	0.60
280.5	0.65
270.5	0.75
255.0	0.90
235.5	1.15
215.5	1.65
185.0	2.55
175.0	3.15
160.0	4.65
145.0	6.95
140.0	8.05
135.5	9.65



Σχήμα 4-6 Καμπύλη Τάσης-Χρόνου Μονωτήρα

$$U(t) = 252.02 \cdot t^{-291} \quad (29)$$

Όπου,

- $U(t)$: τάση στα άκρα του μονωτήρα, (kV)

- t: χρόνος, (μs)

Στο (Laboratory, 2011) υπάρχει η επιλογή προσομοίωσης μονωτήρα με εφαρμογή της (6) για την έκφραση της Κρίσιμης τάσης υπερπήδησης, η οποία δίνεται και στη συνέχεια για ευκολία.

$$U_{CFO} = \left(400 + \frac{710}{t_c^{0.75}}\right) d_g$$

Έγιναν πολλές δοκιμές με το διαθέσιμο κώδικα από τις πηγές. Παρατηρήθηκε ότι οι μοντελοποιήσεις αυτές σε κώδικα δεν θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν αυτούσιες για τους σκοπούς των επιθυμητών δοκιμών προσομοίωσης. Για παράδειγμα, παρατηρήθηκε ότι οι κώδικες δεν μηδένιζαν την μεταβλητή καταμέτρησης του προσωρινού χρόνου έως την υπερπήδηση του μονωτήρα με αποτέλεσμα η επανάληψη της χρήσης του μοντέλου πχ. σε διαδοχικά κεραυνικά πλήγμα όπως ήταν επιθυμητό, να οδηγεί σε λανθασμένα αποτελέσματα (κατά κανόνα αύξηση του διαστήματος έως την υπερπήδηση). Επίσης, για την επαναφορά της απομόνωσης στον μονωτήρα σε όσες από τις υλοποιήσεις το προέβλεπαν, η συνθήκη που επέτρεπε την επαναφορά της απομόνωσης ήταν κάποια σταθερή τιμή χρόνου, η οποία θα έπρεπε να ρυθμίζεται κάθε φορά ανάλογα με τα T_1/T_2 του πλήγματος και έτσι δεν ήταν δυνατή η γενικευμένη χρήση του μοντέλου για οποιαδήποτε T_1/T_2 ιδίως όταν υπήρχαν διαφορετικά T_1/T_2 σε διαδοχικά κεραυνικά πλήγματα κατά τη διάρκεια της ίδιας προσομοίωσης.

Για κάθε μια από αυτές τις προσεγγίσεις έγινε μετατροπή του αρχικού κώδικα του μοντέλου από την αντίστοιχη πηγή.

Οι μετατροπές αφορούσαν:

Model VT_I1: Τακτοποίηση του κώδικα και εισαγωγή σχολίων για την υλοποίηση σύμφωνα με την όπως στην (27) από τον κώδικα στις εργασίες (Τοπάλογλου, 2018) (Παναγόπουλος-Χασσούντ, 2018) (Τσακούμης, 2023). Το αποτέλεσμα των μετατροπών αναφέρεται στη συνέχεια ως Model VT_I1.

Model VT_I2: Εισαγωγή στον κώδικα της (28) μετά τη νέα προσαρμογή της καμπύλης τάσης-χρόνου με τα ίδια πειραματικά δεδομένα που αναφέρονται στις εργασίες (Τοπάλογλου, 2018) (Παναγόπουλος-Χασσούντ, 2018) (Τσακούμης, 2023). Ο κώδικας αναφέρεται στη συνέχεια ως Model VT_I2.

Model VT_I3: Εισαγωγή στον κώδικα της (29) μετά την προσαρμογή της καμπύλης τάσης-χρόνου με τα πειραματικά δεδομένα που εκτιμήθηκαν από το Fig. Του (Mikropoulos & Tsouris, 2022). Ο κώδικας αναφέρεται στη συνέχεια ως Model VT_I3.

Model VT_I4: Τροποποίηση του κώδικα και εισαγωγή σχολίων (Laboratory, 2011) σύμφωνα με την (6) για αυτόνομη λειτουργία του μοντέλου μόνο για καμπύλη τάσης-χρόνου. Ο κώδικας αναφέρεται στη συνέχεια ως Model VT_I4.

Σε όλα τα μοντέλα αναπτύχθηκε μηχανισμός επαναφοράς της απομόνωσης ώστε να είναι δυνατή η χρήση τους σε διαδοχικά κευρανικά πλήγματα και ανεξάρτητα των τιμών των εκάστοτε T_1/T_2 των πληγμάτων.

Κώδικας 4-1 Κώδικας MODEL VT_I1, βάσει της (27) μετά από μετατροπή των (Τοπάλογλου, 2018) (Παναγόπουλος-Χασσούντ, 2018) (Τσακούμης, 2023)

```
MODEL VT1 --Volt-Time curve based on (27) modified (Τοπάλογλου, 2018) (Παναγόπουλος-Χασσούντ,
2018) (Τσακούμης, 2023)

INPUT UP, UT  -- Inputs: UP, UT
OUTPUT CLOSE  -- Output: control of a TACS switch type 13

VAR CLOSE, U, FLASH, C1, C2, TT, TIME, TTFLASH, TFLASH, TNEXT

INIT
  CLOSE:=open  -- CLOSE: switch control to open/close (0/1) the switch - initially open
  C1:=109.82   -- C1: Constant as in (27)
  C2:=30.87    -- C2: Constant as in (27)
  TFLASH:=0    -- Absolute time on which a flashover happens (s) - initially 0
  TT:=0        -- Temporary time till a flashover (s)- initially 0
  TTFLASH:=0   -- Total time till a flashover (s) - initially 0
  TNEXT:=0     -- Absolute time in which the insulator recovers from a flashover (s)
ENDINIT

EXEC
  U:= ABS(UP-UT)     -- Absolute value of voltage across insulator (V)
  IF ((t<>0) AND CLOSE=0) THEN
    TT:=TT+timestep    -- Update temporary time to flashover (s)
    TIME:=TT*10**6     -- Convert time to us
    FLASH:=(C1+(C2*exp(-TIME/22.8)))*1000   -- Calculate flashover voltage (V) as in (27)
    IF (U>=FLASH) THEN   -- if voltage across insulator is greater than the flashover voltage
      CLOSE:=1       -- Flashover happens (the switch closes)
      TFLASH:=t      -- Current time is registered as absolute flashover time
      TTFLASH:=TT    -- Total time till flashover
      TT:=0          -- Temporary time till flashover is set again to 0
    ENDIF
  ENDIF
  TNEXT:= TFLASH+timestep  -- Flashover absolute time plus time step
  IF (CLOSE=1 AND (t>=TNEXT)) THEN -- If switch closed and current time > next time trigger
    CLOSE:=open            -- insulation recovery (the switch opens)
  ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL
```

Κώδικας 4-2 Κώδικας MODEL VT_I2, βάσει της (28)

```
MODEL VT2 --Volt-Time curve based on (28)


INPUT UP, UT  -- Inputs: UP, UT
OUTPUT CLOSE  -- Output: control of a TACS switch type 13

VAR CLOSE, U, FLASH, C1, C2, TT, TIME, TTFLASH, TFLASH, TNEXT

INIT
  CLOSE:=open  -- CLOSE: switch control to open/close (0/1) the switch - initially open
  C1:=-6.673   -- C1: Constant as in (28)
  C2:=141.66    -- C2: Constant as in (28)
  TFLASH:=0    -- Absolute time on which a flashover happens (s) - initially 0
  TT:=0        -- Temporary time till a flashover (s)- initially 0
  TTFLASH:=0   -- Total time till a flashover (s) - initially 0
  TNEXT:=0     -- Absolute time in which the insulator recovers from a flashover (s)
ENDINIT

EXEC
  U:= ABS(UP-UT)     -- Absolute value of voltage across insulator (V)
  IF ((t<>0) AND CLOSE=0) THEN
    TT:=TT+timestep     -- Update temporary time to flashover (s)
    TIME:=TT*10**6     -- Convert time to us
    FLASH:=(C1*ln(TIME)+C2)*1000   -- Calculate flashover voltage (V) as in (28)
    IF (U>=FLASH) THEN   -- if voltage across insulator is greater than the flashover voltage
      CLOSE:=1       -- Flashover happens (the switch closes)
      TFLASH:=t      -- Current time is registered as absolute flashover time
      TTFLASH:=TT    -- Total time till flashover
      TT:=0          -- Temporary time till flashover is set again to 0
    ENDIF
  ENDIF
  TNEXT:= TFLASH+timestep -- last flashover time plus time step
  IF (CLOSE=1 AND (t>=TNEXT)) THEN -- If switch closed and current time > next time trigger
    CLOSE:=open            -- insulation recovery -> the switch opens
  ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL
```

Κώδικας 4-3 Κώδικας MODEL VT_I3, βάσει της (29) από τα πειραματικά δεδομένα του (Mikropoulos & Tsouris, 2022), μετά από μετατροπή (Laboratory, 2011)

```
MODEL VTISF --Volt-Time curve model based on (29) created on data from (Mikropoulos &
Tsouris, 2022), modified from ISF (Laboratory, 2011)

INPUT UP, UT  -- Inputs: UP, UT
OUTPUT CLOSE  -- Output: control of a TACS switch type 13

VAR CLOSE, U, FLASH, C1, C2, TT, TIME, TTFLASH, TFLASH, TNEXT

INIT
  CLOSE:=open  -- CLOSE: switch control to open/close (0/1) the switch - initially open
  C1:=252.02   -- C1: Constant as in (29)
  C2:=-0.291    -- C2: Constant as in (29)
  TFLASH:=0    -- Absolute time on which a flashover happens (s) - initially 0
  TT:=0        -- Temporary time till a flashover (s)- initially 0
  TTFLASH:=0   -- Total time till a flashover (s) - initially 0
  TNEXT:=0     -- Absolute time in which the insulator recovers from a flashover (s)
ENDINIT

EXEC
  U:= ABS(UP-UT)     -- Absolute value of voltage across insulator (V)
  IF ((t<>0) AND CLOSE=0) THEN
    TT:=TT+timestep      -- Update temporary time to flashover (s)
    TIME:=TT*10**6      -- Convert time to us
    FLASH:=C1*(TIME**C2)*1000    -- Calculate flashover voltage (V) as in (29)
    IF (U>=FLASH) THEN   -- if voltage across insulator is greater than the flashover voltage
      CLOSE:=1       -- Flashover happens (the switch closes)
      TFLASH:=t      -- Current time is registered as absolute flashover time
      TTFLASH:=TT    -- Total time till flashover
      TT:=0          -- Temporary time till flashover is set again to 0
    ENDIF
  ENDIF
  TNEXT:= TFLASH+timestep -- last flashover time plus time step
  IF (CLOSE=1 AND (t>=TNEXT)) THEN -- If switch closed and current time > next time trigger
    CLOSE:=open            -- insulation recovery -> the switch opens
  ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL
```

Κώδικας 4-4 Κώδικας MODEL VT_I4, βάσει της (6), μετά από μετατροπή (Laboratory, 2011)

```
MODEL VT_I4 --Volt-Time curve model based on (6), modified from ISF (Laboratory, 2011)


INPUT UP, UT  -- Inputs: UP, UT
OUTPUT CLOSE  -- Output: control of a TACS switch type 13

VAR CLOSE, U, FLASH, C1, C2, D, TT, TIME, TTFLASH, TFLASH, TNEXT

INIT
  CLOSE:=open  -- CLOSE: switch control to open/close (0/1) the switch - initially open
  C1:=400      -- C1: Constant as in (6)=400
  C2:=710      -- C2: Constant as in (6)=710
  D:=0.175     -- D: Dry arching distance for ANSI 56-1 insulator (m)
  TFLASH:=0    -- Absolute time on which a flashover happens (s) - initially 0
  TT:=0        -- Temporary time till a flashover (s)- initially 0
  TTFLASH:=0   -- Total time till a flashover (s) - initially 0
  TNEXT:=0     -- Absolute time in which the insulator recovers from a flashover (s)
ENDINIT

EXEC
  U:= ABS(UP-UT)     -- Absolute value of voltage across insulator (V)
  IF ((t<>0) AND CLOSE=0) THEN
    TT:=TT+timestep    -- Update temporary time till flashover (s)
    TIME:=TT*10**6      -- Convert time to us
    FLASH:=(C1+(C2/(TIME**0.75)))*D*1000   -- Calculate flashover voltage (V) as in (6)
    IF (U>=FLASH) THEN   -- if voltage across insulator is greater than the flashover voltage
      CLOSE:=1       -- Flashover happens (the switch closes)
      TFLASH:=t      -- Current time is registered as absolute flashover time
      TTFLASH:=TT    -- Total time till flashover
      TT:=0          -- Temporary time till flashover is set again to 0
    ENDIF
  ENDIF
  TNEXT:= TFLASH+timestep -- last flashover time plus time step
  IF (CLOSE=1 AND (t>=TNEXT)) THEN -- If switch closed and current time > next time trigger
    CLOSE:=open            -- insulation recovery -> the switch opens
  ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL
```

Όλα τα μοντέλα ελέγχουν έναν διακόπτη τύπου Switch type 13 (Σχήμα 4-7). Η παράμετρος CLOSE στον κώδικα ελέγχει το άνοιγμα ή το κλείσιμο αυτού του διακόπτη. Ο κώδικας είναι παρόμοιος σε όλα τα μοντέλα. Είσοδοι είναι τα δυναμικά στα άκρα του μονωτήρα (UP, UT) και έξοδος το σήμα ελέγχου CLOSE του διακόπτη.

```
INPUT UP, UT  -- Inputs: UP, UT
OUTPUT CLOSE  -- Output: control of a TACS switch type 13
```

Οι παράμετροι όπως στη συνέχεια είναι κοινές στα μοντέλα VT_I1, VT_I2 και VT_I3:

```
VAR CLOSE, U, FLASH, C1, C2, TT, TIME, TTFLASH, TFLASH, TNEXT
  -- CLOSE (0/1): switch control to open/close the switch - initially open
  -- U(V): Voltage across insulator edges
  -- FLASH(V): Flashover voltage
  -- C1: Constant
  -- C2: Constant
  -- TT(s): Temporary time till a flashover - initially set to 0s
  -- TIME(us): Temporary time to flashover in (us)
  -- TFLASH(s): Absolute time on which a flashover happens (s)
  -- TTFLASH(s): Total time till a flashover
```

Στο μοντέλο VT_I4 υπάρχει μια επιπλέον παράμετρος, η παράμετρος D.

```
VAR CLOSE, U, FLASH, C1, C2, D, TT, TIME, TTFLASH, TFLASH, TNEXT
  -- D: Dry arching distance for ANSI 56-1 insulator (m)
```

Αρχικοποιούνται οι παράμετροι του μοντέλου, ανάλογα με την υλοποίηση.

```
INIT
  CLOSE:=open  -- CLOSE: switch control to open/close (0/1) the switch - initially open
  C1:=400      -- C1: Constant as in (6)=400
  C2:=710      -- C2: Constant as in (6)=710
  D:=0.175     -- D: Dry arching distance for ANSI 56-1 insulator (m)
  TFLASH:=0    -- Absolute time on which a flashover happens (s) - initially 0
  TT:=0        -- Temporary time till a flashover (s)- initially 0
  TTFLASH:=0   -- Total time till a flashover (s) - initially 0
  TNEXT:=0     -- Absolute time in which the insulator recovers from a flashover (s)
ENDINIT
```

Κατά την εκτέλεση του μοντέλου υπολογίζεται η τάση στα άκρα του μονωτήρα και ελέγχεται αν ο χρόνος είναι διάφορος από το 0 και εάν ο διακόπτης είναι ανοικτός, δηλαδή αν ο μονωτήρας παρέχει απομόνωση στα άκρα του.

```
  U:= ABS(UP-UT)    -- Absolute value of voltage across insulator (V)
  IF ((t<>0) AND CLOSE=0) THEN
```

Αν συμβαίνει αυτό τότε ανάλογα με την εξίσωση του μοντέλου υπολογίζεται η Κρίσιμη τάση υπερπήδησης, παράμετρος FLASH (V), σύμφωνα με την (27) για το VT_I1, με την (28) για το VT_I2, με την (29) για το VT_I3 και την (6) για το VT-I4. Επειδή στις εξισώσεις αυτές οι μονάδες για τον χρόνο είναι σε μs και για την τάση σε kV γίνονται οι κατάλληλες μετατροπές καθώς κατά την προσομοίωση το ATP EMPT χρησιμοποιεί s για το χρόνο και V για την τάση.

```
    TT:=TT+timestep    -- Update temporary time till flashover (s)
    TIME:=TT*10**6     -- Convert time to us
    FLASH:=(C1+(C2/(TIME**0.75)))*D*1000   -- Calculate flashover voltage (V) as in (6)
```

Αν τιμή της τάσης U στα άκρα του μονωτήρα υπερβεί την τιμή της FLASH, δηλαδή της Κρίσιμης τάσης υπερπήδησης ο διακόπτης κλείνει ώστε να προσομοιωθεί η υπερπήδηση και η διάσπαση του μονωτήρα.

```
    IF (U>=FLASH) THEN   -- if voltage across insulator is greater than the flashover voltage
      CLOSE:=1       -- Flashover happens (the switch closes)
      TFLASH:=t      -- Current time is registered as absolute flashover time
      TTFLASH:=TT    -- Total time till flashover
      TT:=0          -- Temporary time till flashover is set again to 0
    ENDIF
```

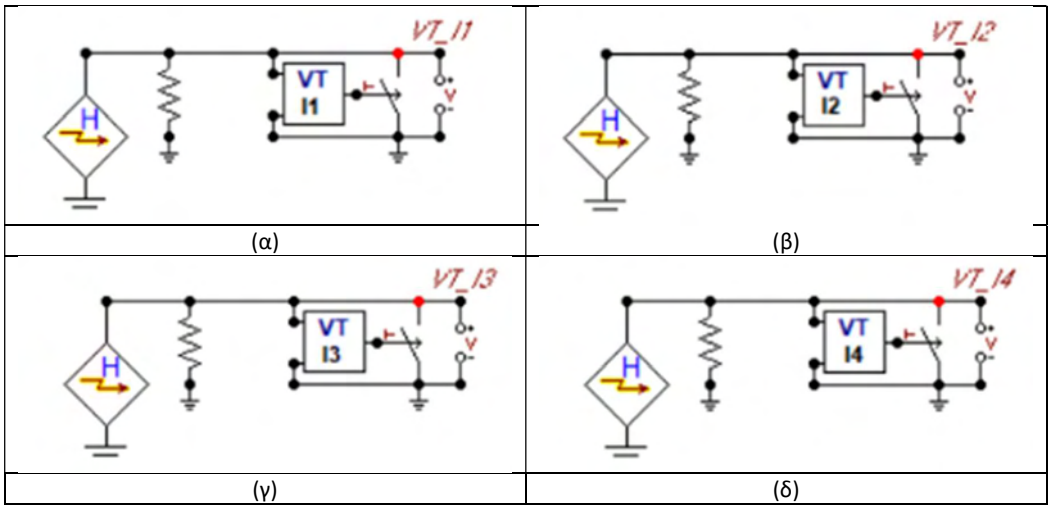
Ταυτόχρονα, καταγράφεται η χρονική στιγμή κατά την οποία έγινε η υπερπήδηση (TFLASH), ο σχετικός χρόνος έως την υπερπήδηση (TTFLASH) και μηδενίζεται παράμετρος που αθροίζει το χρόνο έως την υπερπήδηση.

Ο κώδικας περιλαμβάνει και μια τελική συνθήκη σύμφωνα με την οποία: αν ο διακόπτης είναι κλειστός, δηλαδή έχει υπάρξει σε προγενέστερη χρονική στιγμή υπερπήδηση και ο χρόνος είναι μεγαλύτερος από τη χρονική στιγμή της τελευταίας υπερπήδησης (TFLASH) επαυξημένος κατά το χρονικό βήμα της προσομοίωσης (timestep), τότε ο διακόπτης ανοίγει για να προσομοιωθεί η επαναφορά της απομόνωσης μετά από κάποια υπερπήδηση.

```
TNEXT:= TFLASH+timestep -- last flashover time plus time step
IF (CLOSE=1 AND (t>=TNEXT)) THEN -- If switch closed and current time > next time trigger
  CLOSE:=open            -- insulation recovery -> the switch opens
ENDIF
```

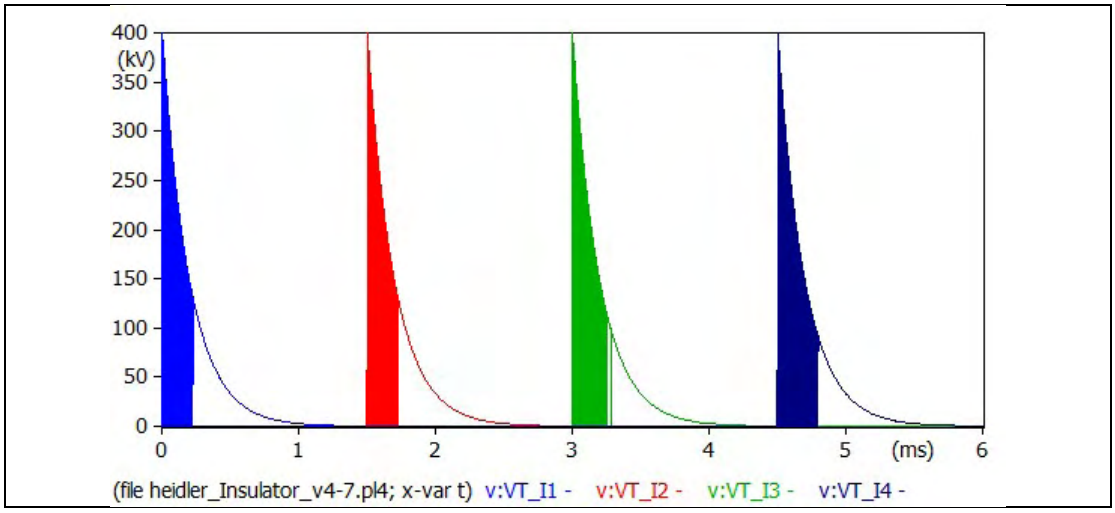
Ο κώδικας που αναπτύχθηκε βελτιώνει τη συμπεριφορά του μοντέλου καθώς επαναφέρει την απομόνωση μετά την υπερπήδηση, αλλά δεν καλύπτει όλες τις περιπτώσεις όπως τη διάτρηση του μονωτήρα, δηλαδή τη μόνιμη απώλεια της απομόνωσης κατά την οποία και δεν θα πρέπει να επανέρχεται ο διακόπτης στην ανοικτή θέση. Επίσης, ενώ παρέχει κατάλληλη προσομοίωση ώστε να εξυπηρετηθούν δοκιμές διαδοχικών κεραυνικών πληγμάτων και να μελετηθούν τα αποτελέσματά, κατά τη διάρκεια κάθε πλήγματος ο διακόπτης ανοίγει και κλείνει, κατάσταση που ίσως αλλοιώνει τους υπολογισμούς των μεταβατικών φαινομένων στο ATP EMPT.

Για τα τέσσερα αυτά μοντέλα μονωτήρα καμπυλών τάσης χρόνου πραγματοποιήθηκαν δοκιμές υπό τις ίδιες συνθήκες και με παρόμοιες διατάξεις όπως στο Σχήμα 4-7. Σε όλες τις διατάξεις χρησιμοποιήθηκε συνάρτηση το στοιχείο Heidler του ATP EMPT με I_{max}=100 kA και T_1/T_2 = 1/200 (μs)/(μs) με την τιμή της παράλληλης αντίστασης ίση με 4Ω για μέγιστη τάση 400 kV.



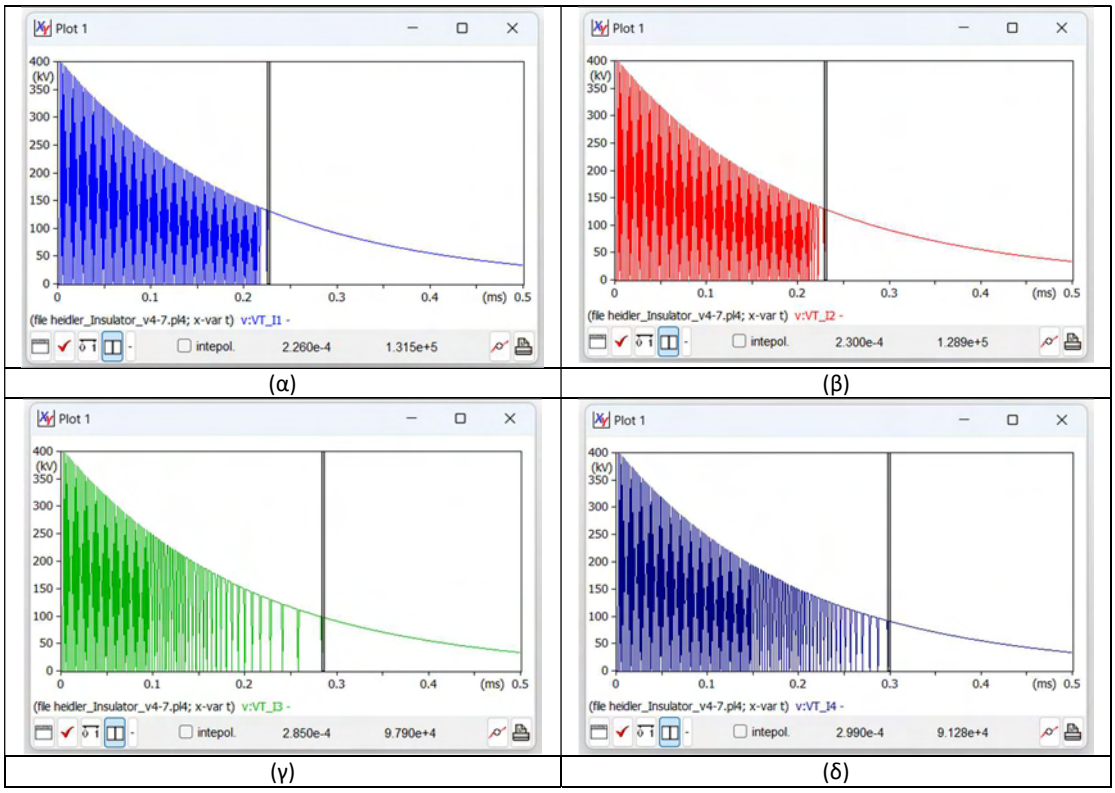
Σχήμα 4-7 Διατάξεις δοκιμών μοντέλου μονωτήρα (α) MODEL VT_I1, (β) MODEL VT_I2, (γ) MODEL VT_I3 και (δ) MODEL VT_I4

Τα αποτελέσματα των δοκιμών και για τα τέσσερα μοντέλα υπό τα ίδια κεραυνικά πλήγματα με τη μόνη διαφορά τους την έναρξη του κευρανικού πλήγματος, φαίνονται στο Σχήμα 4-8. Τα κεραυνικά πλήγματα είχαν χρόνους έναρξης 0 ms, 1.5 ms, 3.0 ms και 4.5 ms για τα μοντέλα VT_I1, VT_I2, VT_I3 και VT_I4, αντίστοιχα.



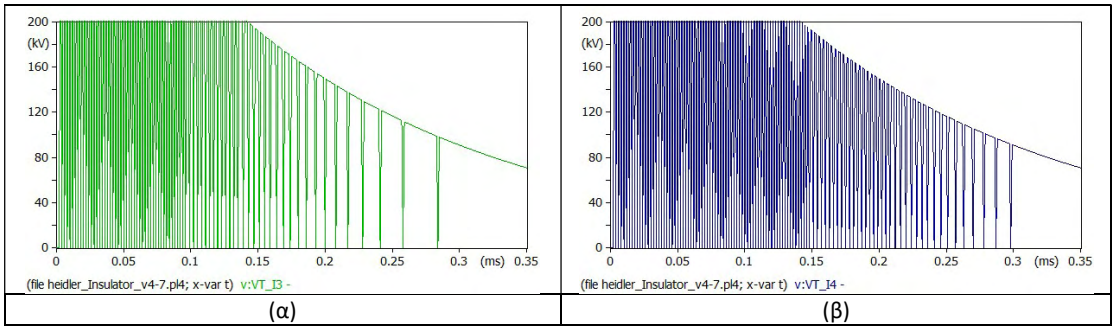
Σχήμα 4-8 Συγκριτικές δοκιμές μοντέλων MODEL VT_I1, VT_I2, VT_I3 και VT_I4

Έγιναν μεμονωμένες δοκιμές και μετρήσεις για κάθε μοντέλο για να βρεθούν οι τάσεις στις οποίες ο μονωτήρας επανέρχεται σε κατάσταση απομόνωσης μετά από αλλεπάλληλες και διαδοχικές υπερπηδήσεις (Σχήμα 4-9). Για τα μοντέλα VT_I1 και VT_I2 οι μετρήσεις έδειξαν τάσεις 131.5 kV και 128.9 kV, αντίστοιχα (Σχήμα 4-9 (α) (β)), ενώ για τα μοντέλα VT_I3 και VT_I4 οι μετρήσεις έδειξαν τάσεις 97.9 kV και 91.28 kV, αντίστοιχα (Σχήμα 4-9 (γ) (δ)). Οι μετρήσεις αυτές επιβεβαιώνουν την αρχική υπόθεση ότι στα μοντέλα VT_I1 και VT_I2 έχουν χρησιμοποιηθεί καμπύλες τάσης χρόνου που μοντελοποιούν διαφορετικούς μονωτήρες σε σχέση με τα μοντέλα VT_I3 και VT_I4. Επίσης η εγγύτητα των τιμών 131.5 kV και 128.9 kV για τα μοντέλα VT_I1 και VT_I2 δείχνει ότι η προσέγγιση της καμπύλης τάσης χρόνου με διαφορετική μέθοδο προσαρμογής βασιζόμενη στα ίδια δεδομένα δε φέρνει διαφορετικά αποτελέσματα, όπως άλλωστε αναμενόταν.



Σχήμα 4-9 Δοκιμές μοντέλων (α) MODEL VT_I1, (β) MODEL VT_I2, (γ) MODEL VT_I3, (δ) MODEL VT_I4

Για τα μοντέλα VT_I3 και VT_I4 τα οποία και μοντελοποιούν μονωτήρα τύπου ANSI 56-1 έγιναν επιπλέον μετρήσεις που εστιάστηκαν κυρίως στους χρόνους πριν από την πλήρη αποκατάσταση της απομόνωσης.



Σχήμα 4-10 Δοκιμές μοντέλων (α) VT_I3 και (β) VT_I4

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών όπως στο Σχήμα 4-10 είναι εμφανές ότι η Κρίσιμη τάση υπερπήδησης υπολογίζεται προοδευτικά σε ένα ή και περισσότερα βήματα μέσα σε κάθε εκτέλεση των μοντέλων VT_I3 και VT_I4 με την υπερπήδηση να ολοκληρώνεται σε 1 ή σε 2 μs και στα τελικά στάδια της ουράς του πλήγματος σε περισσότερα από 10 μs.

Στο μοντέλο VT_I3 όσο στην αρχή η τάση στα άκρα του μονωτήρα έχει υψηλές τιμές (στο μέτωπο) η υπερπήδηση συμβαίνει σε $t_c = 1$ μs αν και Κρίσιμη τάση υπερπήδησης έχει και αυτή υψηλή αρχική τιμή $U_{CFO} \approx 252$ kV. (το χρονικό βήμα της προσομοίωσης είναι 1 μs)

t (s)	t_c (s)	U (kV)	U_{CFO} (kV)	Υπερπήδηση
7,00E-06	**1,00E-06**	**393,02**	**252,02**	**↦**
9,50E-05	**1,00E-06**	**253,15**	**252,02**	**↦**

Στη συνέχεια καθώς η τάση στα άκρα του μονωτήρα έχει μικρότερες από τις αρχικές τιμές, το t_c αρχίζει να αυξάνεται σε 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10 ή και 12 μs και η τιμή της Κρίσιμης τάσης υπερπήδησης πέφτει.

t (s)	t_c (s)	U (kV)	U_{CFO} (kV)	Υπερπήδηση
9,70E-05	1,00E-06	250,63	252,02	
9,80E-05	**2,00E-06**	**249,38**	**205,98**	**↦**
1,36E-04	1,00E-06	206,22	252,02	
1,37E-04	2,00E-06	205,20	205,98	
1,38E-04	**3,00E-06**	**204,17**	**183,06**	**↦**
1,60E-04	1,00E-06	182,91	252,02	
1,61E-04	2,00E-06	181,99	205,98	
1,62E-04	3,00E-06	181,09	183,06	
1,63E-04	**4,00E-06**	**180,18**	**168,36**	**↦**
1,75E-04	1,00E-06	169,69	252,02	
1,76E-04	2,00E-06	168,84	205,98	
1,77E-04	3,00E-06	168,00	183,06	
1,78E-04	4,00E-06	167,16	168,36	
1,79E-04	**5,00E-06**	**166,33**	**157,77**	**↦**

Στο τελευταίο στάδιο όπως φαίνεται και στη λεπτομέρεια στο Σχήμα 4-10(α), ο χρόνος για την ολοκλήρωση της υπερπήδησης έχει αυξηθεί σημαντικά στα 25 μs με τιμή για την Κρίσιμη τάση υπερπήδησης στα 99 kV περίπου.

t (s)	t_c (s)	U (kV)	U_{CFO} (kV)	Υπερπήδηση
2,59E-04	1,00E-06	111,49	252,02	
2,60E-04	2,00E-06	110,94	205,98	
2,61E-04	3,00E-06	110,38	183,06	

2,62E-04	4,00E-06	109,83	168,36	
2,63E-04	5,00E-06	109,29	157,77	
2,64E-04	6,00E-06	108,74	149,62	
2,65E-04	7,00E-06	108,20	143,06	
2,66E-04	8,00E-06	107,66	137,61	
2,67E-04	9,00E-06	107,12	132,97	
2,68E-04	1,00E-05	106,59	128,95	
2,69E-04	1,10E-05	106,06	125,43	
2,70E-04	1,20E-05	105,53	122,29	
2,71E-04	1,30E-05	105,00	119,48	
2,72E-04	1,40E-05	104,48	116,93	
2,73E-04	1,50E-05	103,96	114,60	
2,74E-04	1,60E-05	103,44	112,47	
2,75E-04	1,70E-05	102,92	110,50	
2,76E-04	1,80E-05	102,41	108,68	
2,77E-04	1,90E-05	101,90	106,98	
2,78E-04	2,00E-05	101,39	105,40	
2,79E-04	2,10E-05	100,88	103,91	
2,80E-04	2,20E-05	100,38	102,52	
2,81E-04	2,30E-05	99,88	101,20	
2,82E-04	2,40E-05	99,38	99,95	
2,83E-04	**2,50E-05**	**98,89**	**98,77**	**↦**

Αντίστοιχες είναι οι παρατηρήσεις των επιμέρους μετρήσεων και στο μοντέλο VT_I4. Θα πρέπει να παρατηρηθεί ότι η αρχική τάση υπερπήδησης διαμορφώνεται πλέον στην τιμή $U_{CFO} \approx 194\ \mathrm{kV}$ έναντι των $252\ \mathrm{kV}$ για το μοντέλο VT_I3.

t (s)	t_c (s)	U (kV)	U_{CFO} (kV)	**Υπερπήδηση**
5,00E-06	**1,00E-06**	**393,02**	**194,25**	**↦**
1,45E-04	**1,00E-06**	**195,19**	**194,25**	**↦**

Όμοια με το μοντέλο VT_I3 και στο μοντέλο VT_I4, το t_c αρχίζει να αυξάνεται σε 2, 3, 4, 6 ή και 8 μs και η τιμή της Κρίσιμης τάσης υπερπήδησης πέφτει.

t (s)	t_c (s)	U (kV)	U_{CFO} (kV)	**Υπερπήδηση**
1,47E-04	1,00E-06	193,25	194,25	
1,48E-04	**2,00E-06**	**192,28**	**143,88**	**↦**
2,11E-04	1,00E-06	140,33	194,25	
2,12E-04	2,00E-06	139,63	143,88	
2,13E-04	**3,00E-06**	**138,93**	**124,51**	**↦**
2,35E-04	1,00E-06	124,46	194,25	
2,36E-04	2,00E-06	123,84	143,88	
2,37E-04	3,00E-06	123,22	124,51	
2,38E-04	**4,00E-06**	**122,60**	**113,93**	**↦**
2,50E-04	1,00E-06	115,47	194,25	
2,51E-04	2,00E-06	114,89	143,88	
2,52E-04	3,00E-06	114,32	124,51	
2,53E-04	4,00E-06	113,75	113,93	
2,54E-04	**5,00E-06**	**113,18**	**107,16**	**↦**

Στο τελευταίο στάδιο ο χρόνος για την ολοκλήρωση της υπερπήδησης έχει αυξηθεί στα 10 μs με τιμή για την Κρίσιμη τάση υπερπήδησης στα 92 kV περίπου.

t (s)	t_c (s)	U (kV)	U_{CFO} (kV)	**Υπερπήδηση**
2,86E-04	1,00E-06	96,44	194,25	
2,87E-04	2,00E-06	95,96	143,88	
2,88E-04	3,00E-06	95,48	124,51	
2,89E-04	4,00E-06	95,01	113,93	
2,90E-04	5,00E-06	94,53	107,16	
2,91E-04	6,00E-06	94,06	102,41	
2,92E-04	7,00E-06	93,59	98,87	
2,93E-04	8,00E-06	93,13	96,12	

2,94E-04	9,00E-06	92,66	93,91	
2,95E-04	**1,00E-05**	**92,20**	**92,10**	↦

4.4.2 Προσομοίωση με χρήση της Μεθόδου Ανάπτυξης Οχετού

Στο (Laboratory, 2011) υπάρχει η επιλογή προσομοίωσης μονωτήρα με εφαρμογή της (14) για την εύρεση της ταχύτητας κίνησης του οχετού $v_l(t)$, η οποία δίνεται και στη συνέχεια για ευκολία.

$$v_l(t) = dl/dt = k_3 \cdot u(t) \cdot \left[\frac{u(t)}{(d_g - l)} - E_0\right]$$

Για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν και στην παράγραφο 4.4.1 (π.χ. προσαρμογή σε διαδοχικά κεραυνικά πλήγματα με διαφορετικά T_1/T_2) αναπτύχθηκε μηχανισμός επαναφοράς της απομόνωσης ώστε να είναι δυνατή η χρήση τους σε διαδοχικά κευρανικά πλήγματα και ανεξάρτητα των τιμών των εκάστοτε T_1/T_2 των πληγμάτων. Οι τροποποιήσεις αφορούσαν:

Model LDM_I5: Τροποποίηση του κώδικα και εισαγωγή σχολίων (Laboratory, 2011) σύμφωνα με την (14) για αυτόνομη λειτουργία του μοντέλου μόνο για το μοντέλο ανάπτυξης οχετού και εισαγωγή μηχανισμού επαναφοράς της απομόνωσης ώστε να είναι δυνατή η χρήση του σε διαδοχικά κευρανικά πλήγματα και ανεξάρτητα των τιμών των εκάστοτε T_1/T_2 των πληγμάτων. Ο κώδικας αναφέρεται στη συνέχεια ως Model LDM_I5.

Το αποτέλεσμα των τροποποιήσεων φαίνεται στον πίνακα Κώδικας 4-5.

Κώδικας 4-5 Κώδικας MODEL LDM_I5, βάσει της (14), μετά από μετατροπή (Laboratory, 2011)

```
MODEL LDM_I5 - Leader Development model based on (14), modified from ISF (Laboratory, 2011)

INPUT UP, UT  -- Inputs: UP, UT
OUTPUT CLOSE  -- Output: control of a TACS switch type 13

VAR CLOSE, U, D, L, E, E0, K3, V, TL, TTL, TFLASH, TNEXT

INIT
  CLOSE:=open  -- CLOSE: switch control to open/close (0/1) the switch - initially open
  D:=0.175     -- Dry arching distance for ANSI 56-1 type insulator (m)
  L:=0         -- Leader length (m)
  K3:=1.3      -- Constant or negative polarity as in CIRGE (m^2kV^2/s)
  E:=0         -- Applied filed strength as in CIRGE (kV/m)
  E0:=600      -- Minimum Field Strength constant for negative polarity as in CIRGE (kV/m)
  V:=0         -- Leader development speed (m/s)
  TFLASH:=0    -- Absolute time on which a flashover happens (s) - initially 0
  TL:=0        -- Total leader development time till flash (s) - initially 0
  TTL:=0       -- Temporary leader development time (s)- initially 0
  TNEXT:=0     -- Absolute time in which the insulator recovers from a flashover (s)
ENDINIT

EXEC
  U:= ABS(UP-UT)     -- Absolute value of voltage across insulator (V)
  IF ((t<>0) AND CLOSE=0) THEN
    E:=(U/(1000*(D-L)))  -- Calculate applied field
    IF (E>=E0) THEN  -- if applied field is greater than E0 constant, the leader moves
      V:=K3*U*(E-E0)/1000  -- Calculate leader velocity as in CIRGE (m/s)
      L:=L+V*timestep      -- Calculate leader length
      TTL:=TTL+timestep    -- Calculate of temporary leader development time
    ENDIF
    IF (L>D) THEN -- if leader length is greater than the insulator gap
      CLOSE:=1    -- Flashover happens (the switch closes)
      TFLASH:=t   -- Current time is registered as absolute flashover time
      TL:=TTL      -- Total time till flashover
      L:=0         -- Leader length is set again to 0
      TTL:=0       -- Temporary leader development time till flashover is set again to 0
    ENDIF
```

```
 38:     ENDIF
 39:     IF (TL<>0) THEN
 40:        TNEXT:=TFLASH+timestep
 41:     ENDIF
 42:     IF (CLOSE=1 AND (t>=TNEXT)) THEN
 43:       CLOSE:=open            -- insulation recovery (the switch opens)
 44:     ENDIF
 45:   ENDEXEC
 46:   ENDMODEL
```

Το μοντέλο LDM_I5, όπως και τα μοντέλα καμπύλης τάσης χρόνου VT_Ix, ελέγχει έναν διακόπτη τύπου Switch type 13 (Σχήμα 4-7) με την παράμετρο CLOSE στον κώδικα να ελέγχει το άνοιγμα ή το κλείσιμο αυτού του διακόπτη. Ομοίως με τα μοντέλα VT_Ix, είσοδοι είναι τα δυναμικά στα άκρα του μονωτήρα (UP, UT) και έξοδος το σήμα ελέγχου CLOSE του διακόπτη.

```
INPUT UP, UT  -- Inputs: UP, UT
OUTPUT CLOSE  -- Output: control of a TACS switch type 13
```

Οι παράμετροι είναι:

```
VAR CLOSE, U, D, L, E, E0, K3, V, TL, TTL, TFLASH, TNEXT
  -- CLOSE (0/1): switch control to open/close the switch - initially open
  -- U(V): Voltage across insulator edges
  -- D(m): Dry arching distance for ANSI 56-1 insulator
  -- L(m): Leader length
  -- E(kV/m): Applied filed strength as in (14) (CIGRE Working Group 33.01, 1991)
  -- E0(kV/m): Minimum Field Strength constant as in CIRGE
  -- K3(m^2kV^2/s): Constant as in CIRGE
  -- V(m/s): Leader development speed
  -- TL(s): Total leader development time till flash
  -- TTL(s): Temporary leader development time (s)
  -- TFLASH(s): Absolute time on which a flashover happens (s)
  -- TNEXT(s): Absolute time in which the insulator recovers from a flashover
```

Αρχικοποιούνται οι παράμετροι του μοντέλου, ανάλογα με την υλοποίηση.

```
INIT
  CLOSE:=open  -- CLOSE: switch control to open/close (0/1) the switch - initially open
  D:=0.175     -- Dry arching distance for ANSI 56-1 type insulator (m)
  L:=0         -- Leader length (m)
  K3:=1.3      -- Constant or negative polarity as in CIRGE (m^2kV^2/s)
  E:=0         -- Applied filed strength as in CIRGE (kV/m)
  E0:=600      -- Minimum Field Strength constant for negative polarity as in CIRGE (kV/m)
  V:=0         -- Leader development speed (m/s)
  TFLASH:=0    -- Absolute time on which a flashover happens (s) - initially 0
  TL:=0        -- Total leader development time till flash (s) - initially 0
  TTL:=0       -- Temporary leader development time (s)- initially 0
  TNEXT:=0     -- Absolute time in which the insulator recovers from a flashover (s)
ENDINIT
```

Όμοια με τα μοντέλα VT_Ix, κατά την εκτέλεση του μοντέλου LDM_I5 υπολογίζεται η τάση στα άκρα του μονωτήρα (U) και ελέγχεται αν ο χρόνος της προσομοίωσης είναι διάφορος του 0 και εάν ο διακόπτης (CLOSE) είναι ανοικτός, δηλαδή αν ο μονωτήρας παρέχει απομόνωση στα άκρα του.

```
  U:= ABS(UP-UT)    -- Absolute value of voltage across insulator (V)
  IF ((t<>0) AND CLOSE=0) THEN
```

Αν συμβαίνει αυτό τότε υπολογίζεται η ένταση (E) του εφαρμοζόμενου πεδίου ως το πηλίκο της τάσης στα άκρα του μονωτήρα προς το διάκενο που δεν έχει καλύψει ακόμα ο οχετός που αναπτύσσεται, δηλαδή το μήκος (D) του μονωτήρα μείον το μήκος (L) του Οχετού. Γίνεται προσαρμογή στις μονάδες τάσης γιατί στην (14) η τάση εκφράζεται σε kV ενώ το ATP EMPT χρησιμοποιεί μονάδες τάσεις σε V.

```
    E:=(U/(1000*(D-L)))  -- Calculate applied field
```

Αν η τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου στο απομένον διάστημα είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη τιμή (E0) που απαιτείται ώστε να εξακολουθήσει η ανάπτυξη Οχετού, τότε υπολογίζονται η ταχύτητα μετακίνησης του Οχετού (V) σύμφωνα με την (14) και πάλι με προσαρμογή των μονάδων της τάσης, το μήκος (L) που έχει αναπτύξει ο οχετός κατά τη μετακίνησή του και ο χρόνος που έχει διαρκέσει η ανάπτυξή του, για όσες διαδοχικές

εκτελέσεις του κώδικα το εφαρμοζόμενο πεδίο (E) είναι μεγαλύτερο από την ελάχιστη τιμή (E0). Οι τιμές του E0 και της σταθεράς K3 για αρνητική πολικότητα αναφέρονται αναλυτικά στον Table 3 του (Datsios & Mikropoulos, 2016) και στο (CIGRE Working Group 33.01, 1991) και είναι οι τιμές που έχουν χρησιμοποιηθεί στην αρχικοποίηση των παραμέτρων αυτών.

```
IF (E>=E0) THEN  -- if applied field is greater than E0 constant, the leader moves
  V:=K3*U*(E-E0)/1000  -- Calculate leader velocity as in CIRGE (m/s)
  L:=L+V*timestep      -- Calculate leader length
  TTL:=TTL+timestep    -- Calculate of temporary leader development time
ENDIF
```

Αν το μήκος (L) που έχει αναπτύξει ο οχετός υπερβεί το μήκος (D) του μονωτήρα ο διακόπτης κλείνει ώστε να προσομοιωθεί η υπερπήδηση και η διάσπαση του μονωτήρα.

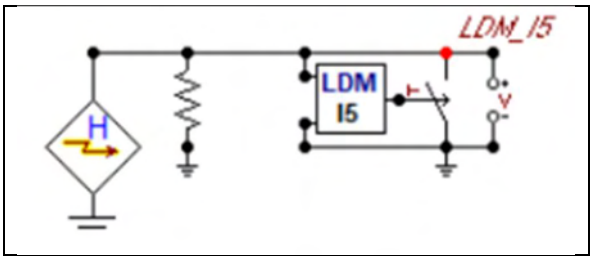
```
IF (L>D) THEN -- if leader length is greater than the insulator gap
  CLOSE:=1    -- Flashover happens (the switch closes)
  TFLASH:=t   -- Current time is registered as absolute flashover time
  TL:=TTL      -- Total time till flashover
  L:=0         -- Leader length is set again to 0
  TTL:=0       -- Temporary leader development time till flashover is set again to 0
ENDIF
```

Ταυτόχρονα, καταγράφεται η χρονική στιγμή κατά την οποία έγινε η υπερπήδηση (TFLASH), ο συνολικός χρόνος έως την υπερπήδηση (TL) και μηδενίζονται το μήκος του Οχετού (L), γιατί από τη στιγμή που έγινε αποκατάσταση της απομόνωσης θα πρέπει να αναπτυχθεί κάποιος νέος και ο προσωρινός χρόνος (TTL) που αθροίζει το χρόνο έως την υπερπήδηση.

Ο κώδικας περιλαμβάνει και μια τελική συνθήκη σύμφωνα με την οποία: αν ο διακόπτης είναι κλειστός, δηλαδή έχει υπάρξει σε προγενέστερη χρονική στιγμή υπερπήδηση και ο χρόνος είναι μεγαλύτερος από τη χρονική στιγμή της τελευταίας υπερπήδησης (TFLASH) επαυξημένος κατά το χρονικό βήμα της προσομοίωσης (timestep), τότε ο διακόπτης ανοίγει για να προσομοιωθεί η επαναφορά της απομόνωσης μετά από κάποια υπερπήδηση.

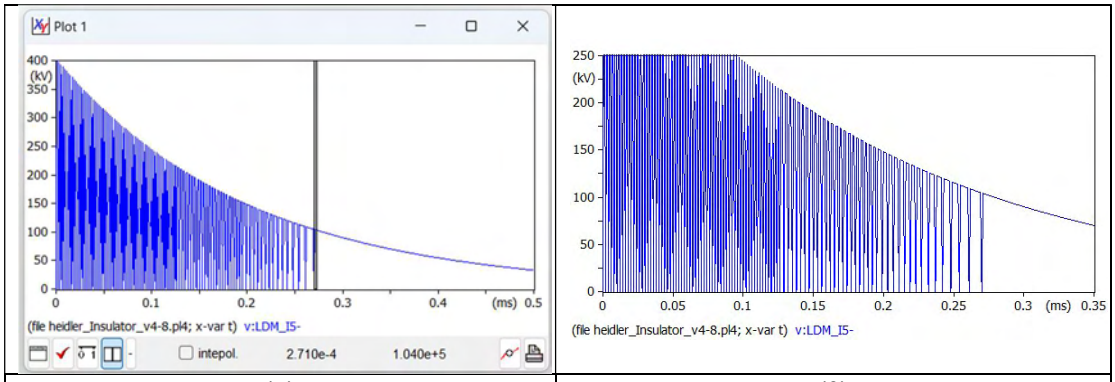
```
TNEXT:= TFLASH+timestep -- last flashover time plus time step
IF (CLOSE=1 AND (t>=TNEXT)) THEN -- If switch closed and current time > next time trigger
  CLOSE:=open            -- insulation recovery -> the switch opens
ENDIF
```

Όπως και για τα μοντέλα VT_Ix έγιναν δοκιμές υπό τις ίδιες συνθήκες και με παρόμοιες διατάξεις με τα μοντέλα VT_Ix, όπως στο Σχήμα 4-11.



Σχήμα 4-11 Διάταξη δοκιμών μοντέλου μονωτήρα LDM_I5

Τα αποτελέσματα των δοκιμών κεραυνικό πλήγμα με I_{max}=100 kA και T_1/T_2 = 1/200 (μs)/(μs) φαίνεται στο Σχήμα 4-12.



(α) (β)

Σχήμα 4-12 Δοκιμές μοντέλου (α) MODEL LDM_I5, (β) LDM_I5 λεπτομέρεια

Από τις μετρήσεις που έγιναν βρέθηκε ότι η τάση μετά την οποία ο μονωτήρας επανέρχεται σε κατάσταση απομόνωσης μετά από αλλεπάλληλες και διαδοχικές υπερπηδήσεις (Σχήμα 4-12 (α)) είναι τα 104 kV. Η τάση αυτή διαφέρει αλλά είναι συγκρίσιμη με τις αντίστοιχες τάσεις που βρέθηκαν για τα μοντέλα VT_I3 και VT_I4 που ήταν 97.9 kV και 91.28 kV, αντίστοιχα (Σχήμα 4-9 (γ) (δ)) που μοντελοποιούν τον ίδιο μονωτήρα τύπου ANSI 56-1.

Για το μοντέλο LDM_I5 παρατηρείται παρόμοια διαδικασία διάσπασης του μονωτήρα με αυτή για τα μοντέλα VT_I3 και VT_I4.

Όσο στην αρχή η τάση στα άκρα του μονωτήρα έχει υψηλές τιμές (στο μέτωπο και στην αρχή της ουράς) η υπερπήδηση συμβαίνει σε $t_c \approx t_l = 1$ μs γιατί τα μήκη l που αναπτύσσει ο οχετός έχουν μεγάλες αρχικές τιμές $l \approx 86$ cm , τιμές που υπερβαίνουν κατά πολύ την απόσταση ξηρού τόξου για μονωτήρα τύπου ANSI 56-1, δηλαδή το $d_g = 17.5$ cm .

t (s)	t_c (s)	U (kV)	l (cm)	Υπερπήδηση
1,00E-06	**1,00E-06**	**400,00**	**87,66**	**↦**
1,25E-04	**1,00E-06**	**215,72**	**17,74**	**↦**

Στη συνέχεια καθώς η τάση στα άκρα του μονωτήρα έχει μικρότερες από τις αρχικές τιμές, το t_c αρχίζει να αυξάνεται σε 2, 3, 4, 5 ή και 6 μs και το μήκος l που αναπτύσσει ο οχετός ενώ αρχικά έχει μικρή τιμή αυξάνεται αλματωδώς και έτσι προκαλείται υπερπήδηση.

t (s)	t_c (s)	U (kV)	l (cm)	Υπερπήδηση
1,27E-04	1,00E-06	213,57	17,22	
1,28E-04	**2,00E-06**	**212,51**	**2135,38**	**↦**
2,00E-04	1,00E-06	148,26	4,76	
2,01E-04	2,00E-06	147,52	15,47	
2,02E-04	**3,00E-06**	**146,78**	**142,15**	**↦**
2,28E-04	1,00E-06	128,89	2,29	
2,29E-04	2,00E-06	128,25	6,34	
2,30E-04	3,00E-06	127,61	15,35	
2,31E-04	**4,00E-06**	**126,97**	**103,13**	**↦**
2,43E-04	1,00E-06	119,58	1,29	
2,44E-04	2,00E-06	118,98	3,37	
2,45E-04	3,00E-06	118,39	7,03	
2,46E-04	4,00E-06	117,80	15,08	
2,47E-04	**5,00E-06**	**117,21**	**79,68**	**↦**

Στο τελευταίο στάδιο όπως φαίνεται και στη λεπτομέρεια στο Σχήμα 4-12 (β) ο χρόνος για την ολοκλήρωση της υπερπήδησης έχει αυξηθεί στα 8 μs με το μήκος που αναπτύσσει ο οχετός να ξεκινά από μια πολύ χαμηλή τιμή 0,3 cm για να υπερβεί στην 8η επανάληψη, μετά την αποκατάσταση της απομόνωσης, το $d_g = 17.5$ cm.

t (s)	t_c (s)	U (kV)	l (cm)	Υπερπήδηση
2,62E-04	1,00E-06	108,74	0,30	
2,63E-04	2,00E-06	108,20	0,71	
2,64E-04	3,00E-06	107,66	1,29	
2,65E-04	4,00E-06	107,12	2,14	
2,66E-04	5,00E-06	106,59	3,44	
2,67E-04	6,00E-06	106,06	5,56	
2,68E-04	7,00E-06	105,53	9,46	
2,69E-04	**8,00E-06**	**105,00**	**19,09**	↦

4.4.3 Σύγκριση Προσομοιώσεων με Καμπύλη Τάσης-Χρόνου/Μέθοδο Ανάπτυξης Οχετού

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων όπως στις παραγράφους 4.4.1και 4.4.2 και τα τρία μοντέλα (VT_I3, VT_4 και LDM_I5) δίνουν παρόμοια αποτελέσματα με τις ίδιες συνθήκες δοκιμών.

Από τα αποτελέσματα μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Η τελευταία υπερπήδηση συμβαίνει για τάση στα άκρα του μονωτήρα περίπου 99 kV, 92 kV και 105 kV για τα μοντέλα VT_I3, VT_4 και LDM_I5, αντιστοίχως.
- Συμβαίνει υπερπήδηση σε χρόνο ίσο ή μικρότερο του 1 μs, κατά το μέτωπο και την αρχή της ουράς τους πλήγματος για διαδοχικές υπερπηδήσεις και αποκαταστάσεις της απομόνωσης, έως και τους χρόνους 95 μs, 145 μs, 128 μs για τα μοντέλα VT_I3, VT_4 και LDM_I5, αντιστοίχως.
- Η τελευταία υπερπήδηση πριν την πλήρη αποκατάσταση της απομόνωσης συμβαίνει σε χρονικό διάστημα 25 μs, 10 μs και 8 μs κατά το χρόνο 282 μs, 295 μs και 269 μs για τα μοντέλα VT_I3, VT_4 και LDM_I5, αντιστοίχως.
- Η τάση στα άκρα του μονωτήρα μετά την τελευταία υπερπήδηση είναι 97.9 kV, 91.28 kV και 104.0 kV για τα μοντέλα VT_I3, VT_4 και LDM_I5, αντιστοίχως.

Από τις παρατηρήσεις αυτές μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι τάσεις στα άκρα του μονωτήρα κατά την τελευταία υπερπήδηση και κατά τη χρονική στιγμή μετά την αποκατάσταση της απομόνωσης, είναι συγκρίσιμες αλλά δεν ταυτίζονται. Υπάρχει καλύτερη προσέγγιση στα αποτελέσματα των VT_I3 και LDM_I5.
- Οι χρόνοι κατά τους οποίους συμβαίνει υπερπήδηση σε χρονικό διάστημα μικρότερο ή ίσο του 1 μs και οι χρόνοι κατά τους οποίους συμβαίνει η τελευταία υπερπήδηση είναι παρόμοιοι αλλά και πάλι δεν ταυτίζονται. Υπάρχει καλύτερη προσέγγιση στα αποτελέσματα των VT_I4 και LDM_I5.
- Το χρονικό διάστημα που συμβαίνει η τελευταία υπερπήδηση διαφέρει πολύ στο μοντέλο VT_I3 σε σχέση με τους χρόνους των VT_I4 και LDM_I5 που δεν ταυτίζονται αλλά προσεγγίζουν καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα που φαίνονται στο Fig. 5 (Mikropoulos & Tsouris, 2022).

Αναζητήθηκαν οι αιτίες τις μη ταύτισης των αποτελεσμάτων των δοκιμών των μοντέλων VT_I3, VT_4 και LDM_I5, διατηρώντας την υπόθεση ότι και τα τρία αυτά μοντέλα μοντελοποιούν σε ικανό βαθμό τον υπό μελέτη μονωτήρα τύπου ANSI 56-1. Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν είναι:

- Υπάρχει μεγάλο πλήθος υπερπηδήσεων που συγκεντρώνεται στο μέτωπο και σε μεγάλο τμήμα της ουράς του πλήγματος, εκεί δηλαδή που η τάση στα άκρα του μονωτήρα εξακολουθεί να είναι μεγάλη, τα οποία συμβαίνουν σε χρόνους πολύ

μικρότερους του 1 μs. Οι υλοποιήσεις όμως των μοντέλων με την αποκατάσταση της απομόνωσης την επόμενη διακριτή στιγμή προσομοίωσης (το χρονικό βήμα της προσομοίωσης είναι 1 μs) έχει ως αποτέλεσμα τη χρονική ολίσθηση του φαινομένου προς το μέλλον. Μάλιστα αυτό εντείνεται με μετάθεση κάθε φορά 2 μs καθώς το κλείσιμο του διακόπτη στην προσομοίωση συμβαίνει 1μs μετά την διαπίστωση της υπερπήδησης και η αποκατάσταση της απομόνωσης 1μs αργότερα, δηλαδή συνολικά 2 μs έως την επόμενη εκτέλεση του κώδικα των μοντέλων.

Αναζητήθηκαν λύσεις που θα μπορούσαν να αποκαταστήσουν τα προβλήματα που διαπιστώθηκαν. Δοκιμάστηκε μείωση του βήματος της προσομοίωσης από το 1 μs στο 1 ns. Τα αποτελέσματα εμφάνιζαν παρόμοιες αποκλίσεις καθώς οι σχέσεις που υλοποιούν τα μοντέλα έχουν ως παράμετρο το χρόνο. Διαπιστώθηκε ότι το πρόβλημα προκαλείται από την καθυστέρηση που εισάγει η τελευταία συνθήκη στις γραμμές 32-35 (Κώδικας 4-3), 33-36 (

Κώδικας 4-4) και 39-44 (Κώδικας 4-5) που επαναφέρουν την απομόνωση μετά από κάθε υπερπήδηση. Μάλιστα, η άμεση αποκατάσταση της απομόνωσης στα άκρα του μονωτήρα δεν είναι συμβατή με το φυσικό φαινόμενο, καθώς δεν αναμένεται να μπορεί ο μονωτήρας να προσφέρει και πάλι απομόνωση μετά από εφαρμογή υψηλών τάσεων.

Για το λόγο αυτό αναζητήθηκε διαφορετική μέθοδος αποκατάστασης της απομόνωσης μετά από κάθε υπερπήδηση. Επειδή το κλείσιμο του διακόπτη κάνει ισοδυναμικά τα άκρα του, η χρήση του μεμονωμένου δυναμικού σε κάποιο από τα δύο άκρα του δεν μπορεί να αποτελεί κριτήριο καθώς ο στόχος είναι η μοντελοποίηση του μονωτήρα. Η λύση που επιλέχθηκε είναι η θέση του χρόνου αποκατάστασης της απομόνωσης σε χρόνο αντιστρόφως ανάλογο του χρονικού διαστήματος έως την τελευταία υπερπήδηση. Με αυτό τον τρόπο η αποκατάσταση της απομόνωσης θα συμβαίνει μετά από κάποιο σχετικά μεγάλο διάστημα αν η προηγούμενη υπερπήδηση έχει συμβεί σε κάποιο μικρό χρονικό διαστήματα, όπως συμβαίνει κατά το μέτωπο ή και την αρχή της ουράς του πλήγματος και μετά από κάποιο μικρό χρονικό διάστημα αν η προηγούμενη υπερπήδηση έχει ολοκληρωθεί σε κάποιο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

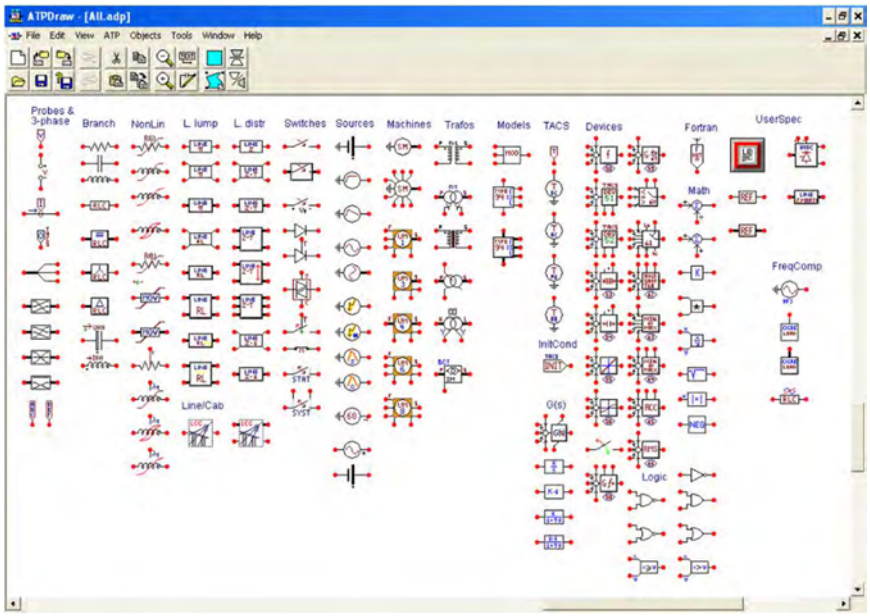
5 Περιβάλλον Προσομοίωσης και Μοντελοποίηση Δικτύου

5.1 Το λογισμικό ATP – EMTP / ATPDraw

Το πρόγραμμα ανάλυσης ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων EMTP (ElectroMagnetic Transient Program) αναπτύχθηκε στο Όρεγκον των ΗΠΑ από την Bonneville Power Administration (BPA), συνεργάτη της Αμερικάνικης Υπηρεσίας Ενέργειας.

Το ATP-EMTP αναγνωρίζεται ως ένα από τα πιο διαδεδομένα προγράμματα προσομοίωσης ηλεκτρομαγνητικών και ηλεκτρομηχανικών συστημάτων και φαινομένων για ΣΗΕ. Διατίθεται μέσω των ιστοσελίδων του οργανισμού ATP-EMTP (https://www.atp-emtp.org/) από όπου και διατίθεται το εγχειρίδιο χρήσης του. Το λογισμικό διαθέτει δυνατότητες ανάλυσης σύνθετων κυκλωμάτων στο πεδίο του χρόνου επιλύοντας μέσω αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων των στοιχείων των κυκλωμάτων, παρέχοντας αποτελέσματα τόσο για τα μεταβατικά φαινόμενα όσο και τα φαινόμενα μόνιμης κατάστασης. Για τους λόγους αυτούς επιλέχθηκε ως το καταλληλότερο για τις προσομοιώσεις της εργασίας.

Στην εργασία χρησιμοποιήθηκε το ATPDraw, ενός γραφικού προεπεξεργαστή του ATP για υπολογιστές με λειτουργικό σύστημα Windows. Το ATPDraw παρέχει τη δυνατότητα γραφικής δημιουργίας κυκλωμάτων με στοιχεία που μπορούν να επιλεγούν από τα διαθέσιμα προκαθορισμένα στοιχεία του λογισμικού (περίπου 70), όπως στην Εικόνα 5-1. Αυτά τα στοιχεία μπορούν να παραμετροποιηθούν ώστε να καλύπτουν τις ανάγκες της προσομοίωσης.



Εικόνα 5-1: Τα έτοιμα διαθέσιμα στοιχεία κυκλωμάτων του ATPdraw

Οι κατηγορίες των στοιχείων είναι : Branch Linear (Γραμμικά στοιχεία), Branch Nonlinear (Μη γραμμικά στοιχεία), Switches (Διακόπτες), Sources (Πηγές), Machines (Μηχανές), Transformers (Μετασχηματιστές). Σε κάθε μια από αυτές τις κατηγορίες διατίθενται έτοιμα προς παραμετροποίηση στοιχεία. Για παράδειγμα στα γραμμικά στοιχεία περιλαμβάνονται: γραμμικός αντιστάτης, γραμμικός επαγωγός, γραμμικός πυκνωτής, καθώς και διάφοροι συνδυασμοί αυτών για μονοφασικά ή τριφασικά κυκλώματα.

Αυτό που κάνει το λογισμικό ιδιαίτερα χρήσιμο είναι η δυνατότητα δημιουργίας νέων στοιχείων μέσω προγραμματισμού (MODELS). Αυτό το χαρακτηριστικό αξιοποιήθηκε εκτενώς, για τις προσομοιώσεις των κεραυνικών πληγμάτων (παράγραφος 4.2) και τη δημιουργία μοντέλων αισθητήρων (παράγραφος 4.4).

Το ATPDraw παράγει αποτελέσματα σε δύο αρχεία, ένα τύπου (.lis) και ένα τύπου (.pl4). Στο αρχείο .lis το λογισμικό αποθηκεύει όλες τις πληροφορίες της προσομοίωσης πχ. χρόνους, τιμές ηλεκτρικών μεγεθών, πληροφορίες εκτέλεσης, πιθανά σφάλματα εκτέλεσης κλπ. Στο αρχείο .pl4 το λογισμικό αποθηκεύει δεδομένα τα οποία χρησιμοποιεί το λογισμικό PlotXY για τη δημιουργία γραφικών παραστάσεων.

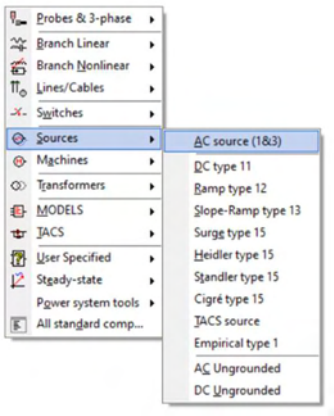
5.2 Μοντελοποίηση στοιχείων δικτύου μέσης τάσης

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση του δικτύου είναι:

- **Γεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης**
- **Γραμμή μεταφοράς μέσης τάσης 20 kV**
- **Στύλοι από ενισχυμένο σκυρόδεμα**
- **Αντίσταση γείωσης στύλου**
- **Μονωτήρες εναέριας γραμμής**
- **Κρουστική γεννήτρια κεραυνικών πληγμάτων**
- **Εμπεδήσεις Προσαρμογής**

5.2.1 Γεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης

Η γεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης μοντελοποιήθηκε με τη χρήση του στοιχείου *AC source (1&3)* του ATPDraw. Η εισαγωγή της στο γραφικό σχέδιο του κυκλώματος γίνεται με δεξί κλικ στο περιβάλλον του ATPdraw, επιλογή *Sources→ AC source(1&3)*.



Με τη εισαγωγή του στοιχείου *AC source(1&3)* εμφανίζεται το εικονίδιό του (Εικόνα 5-2 (α)). Η παραμετροποίηση της πηγής εναλλασσόμενης τάσης γίνεται με άνοιγμα, με διπλό κλικ πάνω στο εικονίδιο του στοιχείου, του σχετικού παραθύρου και την εισαγωγή τιμών για τις παραμέτρους του στοιχείου σε αυτό (Εικόνα 5-2 (γ)).

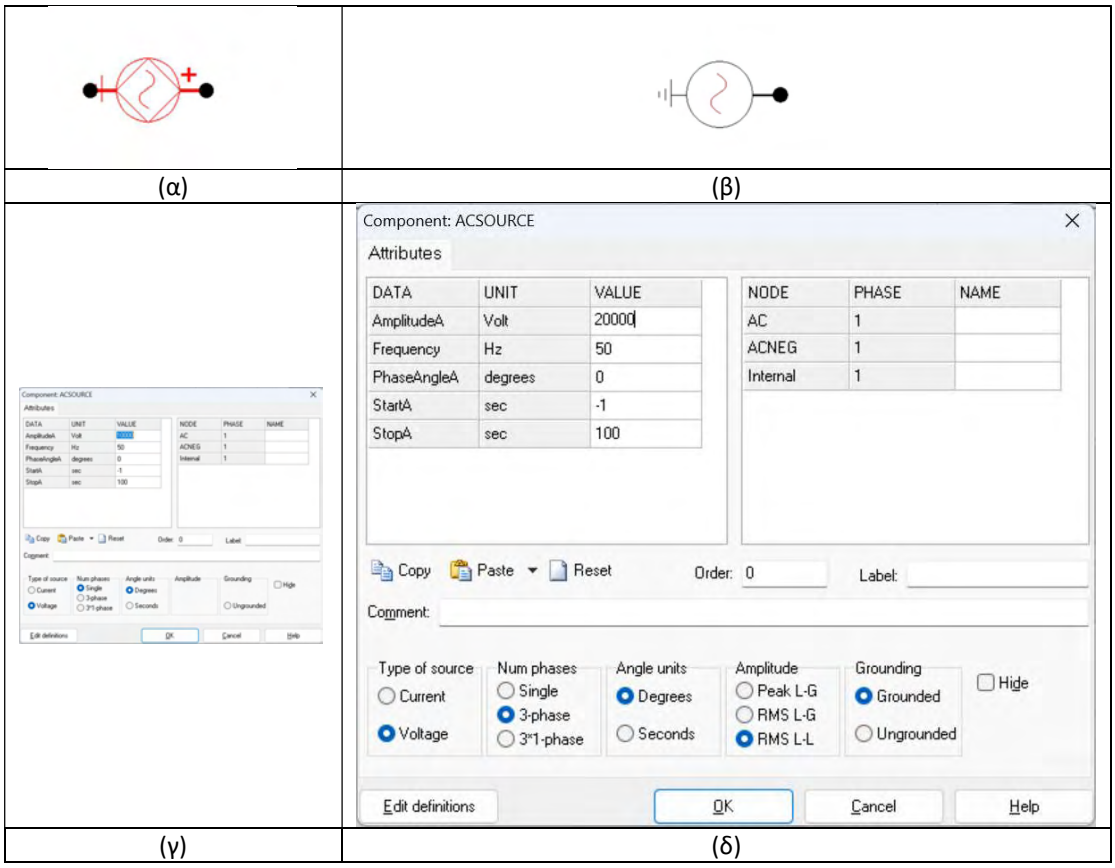
Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την παραμετροποίηση της εναλλασσόμενης πηγής τάσης φαίνονται στον πίνακα Πίνακας 5-1.

Πίνακας 5-1: Τιμές παραμέτρων στοιχείου AC source(1&3).

Πεδίο	Τιμή	Μονάδα	Σχόλια
AmplitudeA	20000	V	Η πολική τιμή της μέσης τάσης στο Ελληνικό δίκτυο είναι 20 kV
Frequency	50	Hz	Η συχνότητα του Ελληνικού δικτύου είναι 50 Hz
PhaseAngleA	0	°	Η γωνία της φάσης Α επιλέγεται στις 0 μοίρες. Η ανάθεση τιμής στη γωνία φάσης Α συσχετίζεται με τις κατάλληλες επιλογές στα πεδία δεδομένων (στη συνέχεια).
Angle Units	Degrees		Ορίζεται η μονάδα για τη γωνία των φάσεων σε μοίρες (η επιλογή βρίσκεται στο κάτω μέρος του παραθύρου).
Num phases	3-phase		Ορίζεται τριφασική γεννήτρια. Με την επιλογή αυτή οι φάσεις Β και C τίθενται αυτόματα σε φασικές γωνίες με διαφορά 120° σε σχέση με τη φάση Α (η επιλογή βρίσκεται στο κάτω μέρος του παραθύρου).
StartA	-1	s	Ορίζεται ως χρόνος έναρξης της λειτουργίας της γεννήτριας στο 1 s πριν την έναρξη της προσομοίωσης.

StopA	100	s	Ο χρόνος λήξης της λειτουργίας της γεννήτριας. Επιλέγονται τα 100 s, χρόνος κατά πολύ μεγαλύτερος του χρόνου προσομοίωσης.
Type of source	Voltage		Ορίζεται η πηγή ως γεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης (η επιλογή βρίσκεται στο κάτω μέρος του παραθύρου).
Amplitude	RMS L-L		Ορίζεται η χρήση του πεδίου Amplitude ως η ενεργή τιμή (RMS) της πολικής τάσης (L-L : Line to Line) (η επιλογή βρίσκεται στο κάτω μέρος του παραθύρου).
Grounding	Grounded		Εισάγεται γείωση στη γεννήτρια.

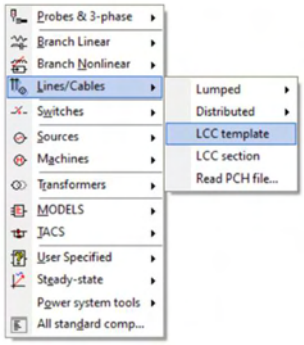
Μετά την εισαγωγή των παραμέτρων όπως στον Πίνακας 5-1 το εικονίδιο της εναλλασσόμενης πηγής τάσης αλλάζει για δείξει το αντίστοιχο σύμβολο (Εικόνα 5-2 (β)). Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν όπως στον Πίνακας 5-1 φαίνονται στο παράθυρο παραμέτρων που διαμορφώθηκε όπως στην Εικόνα 5-2 (δ).



Εικόνα 5-2: Στοιχείο AC source(1&3): (α) Αρχικό εικονίδιο στοιχείου, (β) Εικονίδιο στοιχείου μετά την παραμετροποίηση, (γ) Αρχικό παράθυρο παραμέτρων, (δ) Παράθυρο παραμέτρων μετά την παραμετροποίηση.

5.2.2 Γραμμή μεταφοράς μέσης τάσης 20 kV

Η γραμμή μεταφοράς μέσης τάσης 20 kV μοντελοποιήθηκε με τη χρήση του στοιχείου *LCC template* του ATPDraw. Η εισαγωγή της στο γραφικό σχέδιο του κυκλώματος γίνεται με δεξί κλικ στο περιβάλλον του ATPdraw, επιλογή *Lines/Cables→ LCC template*.



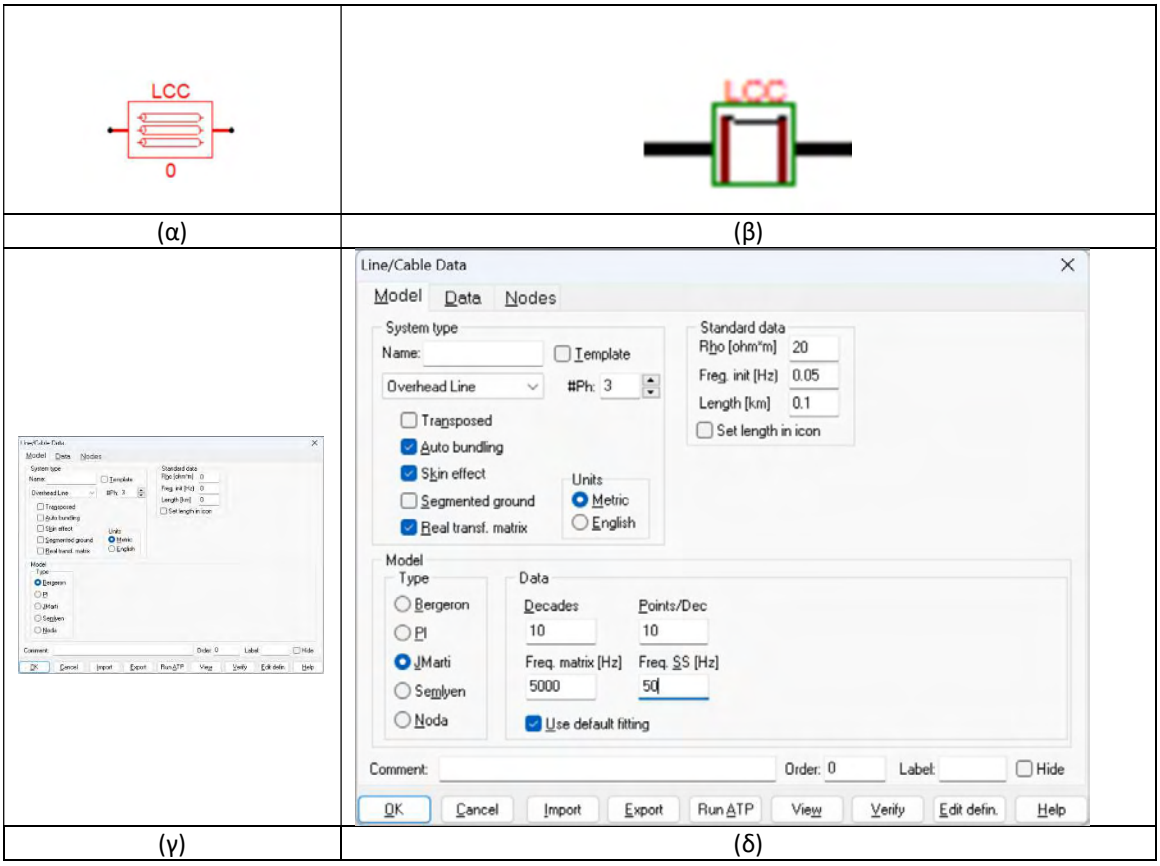
Με τη εισαγωγή του στοιχείου *LCC template* εμφανίζεται το εικονίδιό του (Εικόνα 5-3 (α)). Η παραμετροποίηση της γραμμής μεταφοράς μέσης γίνεται με άνοιγμα, με διπλό κλικ πάνω στο εικονίδιο του στοιχείου, του σχετικού παραθύρου και την εισαγωγή τιμών για τις παραμέτρους του στοιχείου σε αυτό (Εικόνα 5-3 (γ)).

Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την παραμετροποίηση του γενικού μοντέλου της γραμμής μεταφοράς μέσης τάσης φαίνονται στον πίνακα Πίνακας 5-2.

Πίνακας 5-2: Τιμές παραμέτρων του γενικού μοντέλου του στοιχείου LCC template (γραμμή μεταφοράς)

Πεδίο	**Τιμή**	**Μονάδα**	**Σχόλια**
System Type			
Overhead Line			Επιλογή εναέριας γραμμής μεταφοράς
#ph	3		Επιλογή γραμμής τριών φάσεων
Auto bundling	☑		Επιλογή αυτόματης ομαδοποίησης των παραμέτρων της γραμμής
Skin effect	☑		Επιλογή ενεργοποίησης προσομοίωσης του επιδερμικούαινομένου για τους αγωγούς
Real transf. matrix	☑		Επιλογή ενεργοποίησης χρήσης πραγματικής μήτρα μετασχηματισμών
Units	Metric		Επιλογή μετρικού συστήματος μονάδων
Standard Data			
Rho	20	Ωm	Τιμή ειδικής αντίστασης ομοιογενούς εδάφους
Freq. init	0.05	Hz	Τιμή αρχικής συχνότητας μοντέλου προσομοίωσης γραμμής
Length	0.1	km	Τιμή απόστασης ανάμεσα σε διαδοχικούς στύλους (100 m)
Model			
JMarti	☑		Επιλέγεται ως μοντέλο προσομοίωσης το μοντέλο JMarti. Αυτό το μοντέλο είναι εξαρτώμενο από τη συχνότητα με σταθερή μήτρα μετασχηματισμού. Είναι τοποθετημένο σε μια περιοχή συχνοτήτων που καθορίζεται από τον αριθμό των δεκάδων (Decades), τη συχνότητα δειγμάτων (Freq. matrix) και τον αριθμό των δειγματοληπτικών μονάδων ανά δεκάδα (Points/Dec).
Decades	10		Επιλογή αριθμού δεκάδων
Points/Dec	10		Επιλογή αριθμού δειγματοληπτικών μονάδων ανά δεκάδα
Freq. matrix	5000		Επιλογή συχνότητας δειγμάτων πίνακα
Freq. SS	50		Επιλογή συχνότητας σταθερής κατάστασης (υπολογισμός της συνθήκης σταθερής κατάστασης)

Μετά την εισαγωγή των παραμέτρων όπως στον Πίνακας 5-2 το εικονίδιο της εναλλασσόμενης πηγής τάσης αλλάζει για δείξει το αντίστοιχο σύμβολο (Εικόνα 5-3 (β)). Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν όπως στον Πίνακας 5-2 φαίνονται στο παράθυρο παραμέτρων που διαμορφώθηκε όπως στην Εικόνα 5-3 (δ).



Εικόνα 5-3: Στοιχείο LCC template: (α) Αρχικό εικονίδιο στοιχείου, (β) Εικονίδιο στοιχείου μετά την παραμετροποίηση, (γ) Αρχικό παράθυρο παραμέτρων, (δ) Παράθυρο παραμέτρων μετά την παραμετροποίηση.

Εκτός όμως αυτών των παραμέτρων του γενικού μοντέλου προσομοίωσης της γραμμής μεταφοράς, το στοιχείο *LCC template* πρέπει να παραμετροποιηθεί για τα δεδομένα των επιμέρους αγωγών. Η εισαγωγή αυτών των δεδομένων γίνεται με επιλογή της καρτέλας *Data* (Εικόνα 5-4).

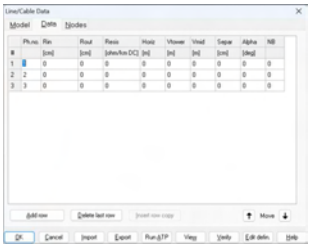
Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την παραμετροποίηση των δεδομένων του αγωγού για κάθε φάση φαίνονται στον πίνακα Πίνακας 5-3.

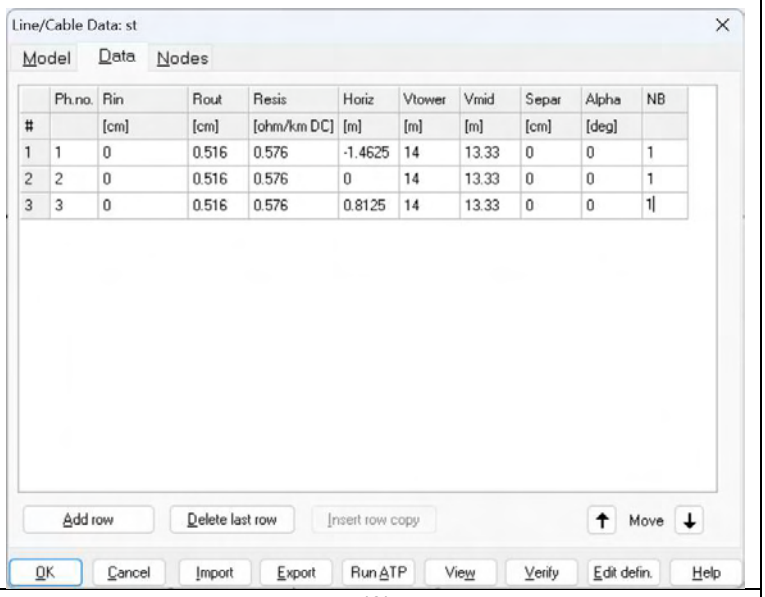
Πίνακας 5-3: Τιμές παραμέτρων των δεδομένων των αγωγών στοιχείου LCC template (γραμμή μεταφοράς).

Πεδίο	**Τιμή**	**Μονάδα**	**Σχόλια**
Rin	0	cm	Τιμή εσωτερικής ακτίνας αγωγού. Λαμβάνεται μηδενική.
Rout	0.516	cm	Τιμή εξωτερικής ακτίνας αγωγού (έχει υπολογισθεί στην παράγραφο 3.2.3)
Resis	0.576	Ω/km	Τιμή ειδικής αντίστασης των αγωγών στο χαμηλότερο σημείο συχνότητας (Freq. init) (από τα φύλλα δεδομένων του αγωγού ACSR 35).
Horiz	-1.4625 0 0.8125	m	Οριζόντια απόσταση από το κέντρο μιας συστοιχίας φάσεων προς έναν αγωγό αναφοράς επιλεγμένο από τον χρήστη. Ο αγωγός αναφοράς επιλέχθηκε να είναι ο αγωγός της φάσης Β (οι αποστάσεις έχουν υπολογισθεί στην παράγραφο 3.2.4).
Vtower	14	m	Απόσταση αγωγών από το έδαφος. Τίθεται ίση με το ύψος του στύλου (η επιλογή ύψους στύλου γίνεται στην παράγραφο 3.1.1)
Vmid	13.3	m	Μέση απόσταση αγωγών από το έδαφος (οι μέσες αποστάσεις έχουν υπολογισθεί στην παράγραφο 3.2.5).

Separ	0	cm	Απόσταση μεταξύ αγωγών που ανήκουν στην ίδια συστοιχία. Η κάθε συστοιχία φάσεων να αποτελείται από έναν μόνο αγωγό. Συνεπώς η παράμετρος Separ λαμβάνει μηδενική τιμή.
Alpha	0	Ωm	Γωνιακή θέση κάθε αγωγού σε μία συστοιχία αγωγών. Μηδενική τιμή.
NB	1		Αριθμός αγωγών σε μία συστοιχία φάσεων. Κάθε συστοιχία φάσεων αποτελείται από έναν μόνο αγωγό.

Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν όπως στον Πίνακας 5-3 φαίνονται στο παράθυρο παραμέτρων που διαμορφώθηκε όπως στην Εικόνα 5-4 (β).

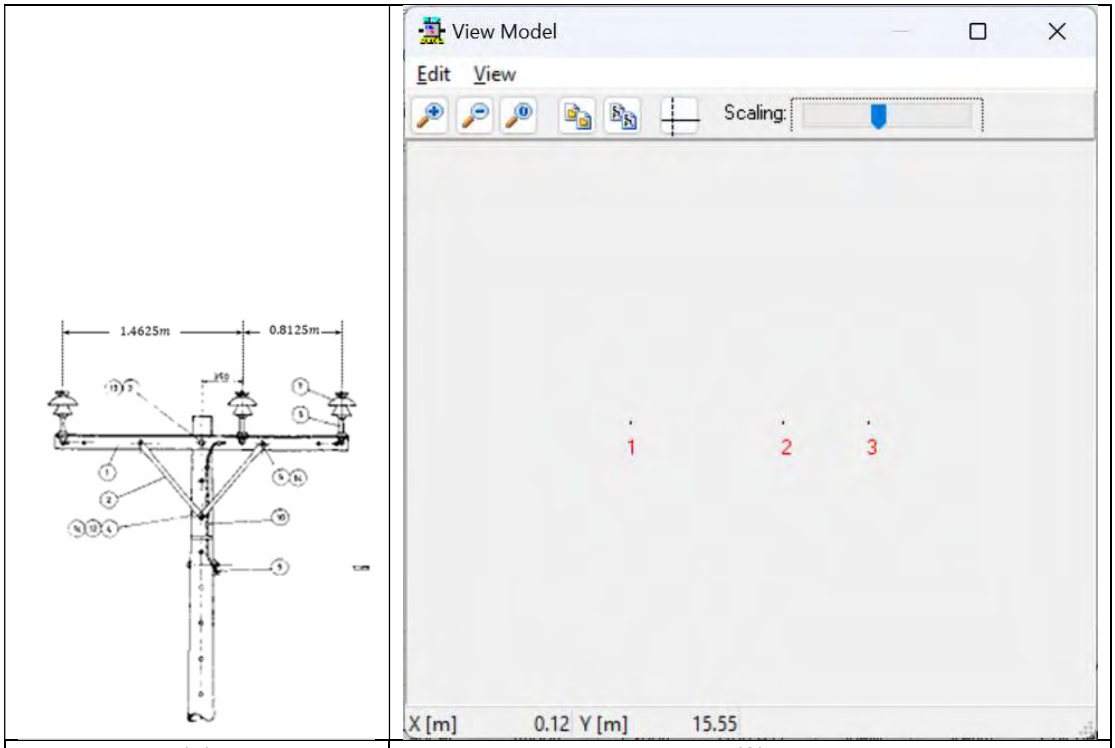




(α) (β)

Εικόνα 5-4: Στοιχείο LCC template, καρτέλα Data για τα δεδομένα παραμέτρων των αγωγών: (α) Αρχικό παράθυρο παραμέτρων, (β) Παράθυρο παραμέτρων μετά την παραμετροποίηση.

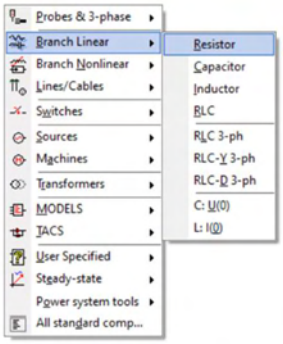
Μετά την εισαγωγή των παραμέτρων όπως στον Πίνακας 5-3 ελέγχουμε την οριζόντια διάταξη των αγωγών πάνω στο βραχίονα. Επιλέγοντας *View* (κάτω δεξιά στο παράθυρο) δίδεται η δυνατότητα να δούμε τη γεωμετρική απεικόνιση των δεδομένων που εισάχθηκαν στην καρτέλα Data, για την οπτική επιβεβαίωση της διάταξης (Εικόνα 5-5).



(α) (β)

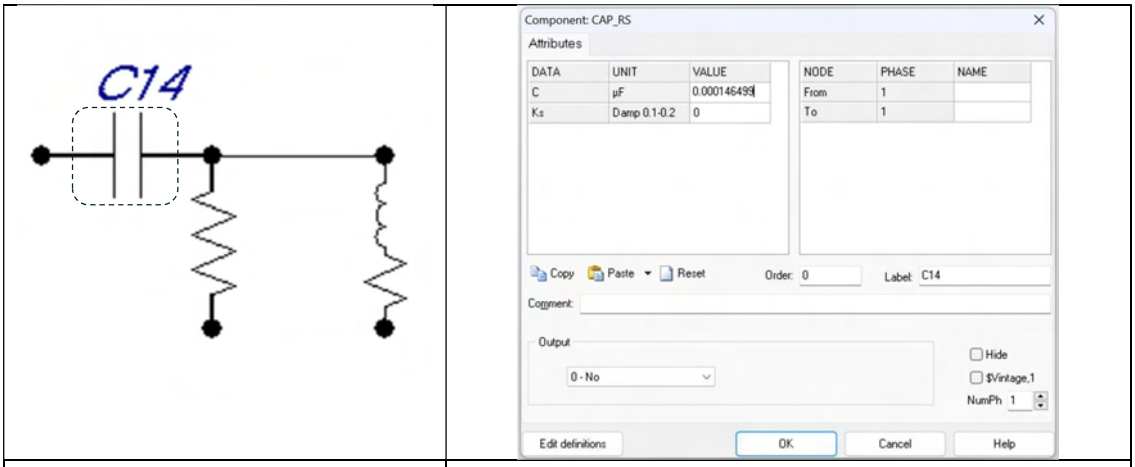
Εικόνα 5-5: Στοιχείο LCC template, γεωμετρική απεικόνιση των δεδομένων καρτέλας Data: (α) Αρχική γεωμετρική αποτύπωση, (β) Γεωμετρική απεικόνιση μετά την παραμετροποίηση.

5.2.3 Στύλοι από ενισχυμένο σκυρόδεμα



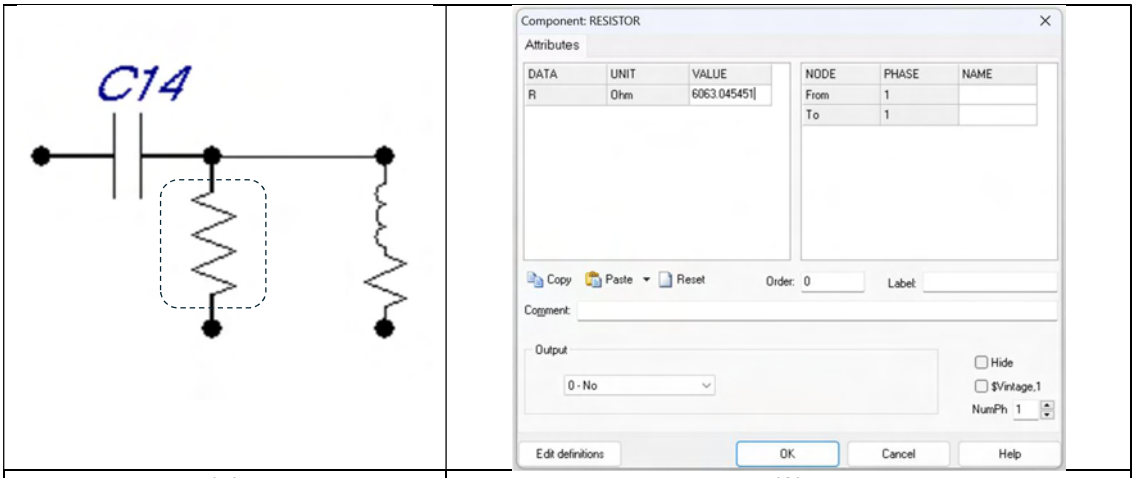
Οι στύλοι στήριξης αποτελούνται από στοιχεία αντιστάσεων (R), επαγωγών (L) και χωρητικοτήτων (C). Η εισαγωγή της στο γραφικό σχέδιο του κυκλώματος γίνεται με δεξί κλικ στο περιβάλλον του ATPDraw, με επιλογή είτε *Branch Linear→ Resistor* (στοιχεία αντιστάσεων), είτε *Branch Linear→ Inductor* (στοιχεία επαγωγών), είτε *Branch Linear→ Capacitor* (στοιχεία χωρητικοτήτων).

Όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 3.1.2 κάθε ένας από τους στύλους στήριξης χωρίσθηκε σε 14 τμήματα, μήκους 1 m. Για κάθε ένα από αυτά τα 14 τμήματα υπολογίσθηκαν η επαγωγική αντίσταση του πλέγματος χάλυβα (παράγραφος 3.1.3), η ωμική αντίσταση του πλέγματος χάλυβα (παράγραφος 3.1.4), η ωμική αντίσταση του σκυροδέματος (παράγραφος 3.1.5) και η χωρητικότητα κάθε τμήματος με το έδαφος (παράγραφος 3.1.6). Έτσι, με εισαγωγή και παραμετροποίηση των κατάλληλων στοιχείων του ATPDraw, κάθε τμήμα ενός στύλου μπορεί να μοντελοποιηθεί όπως στις εικόνες (Εικόνα 5-6, Εικόνα 5-7 και Εικόνα 5-8).



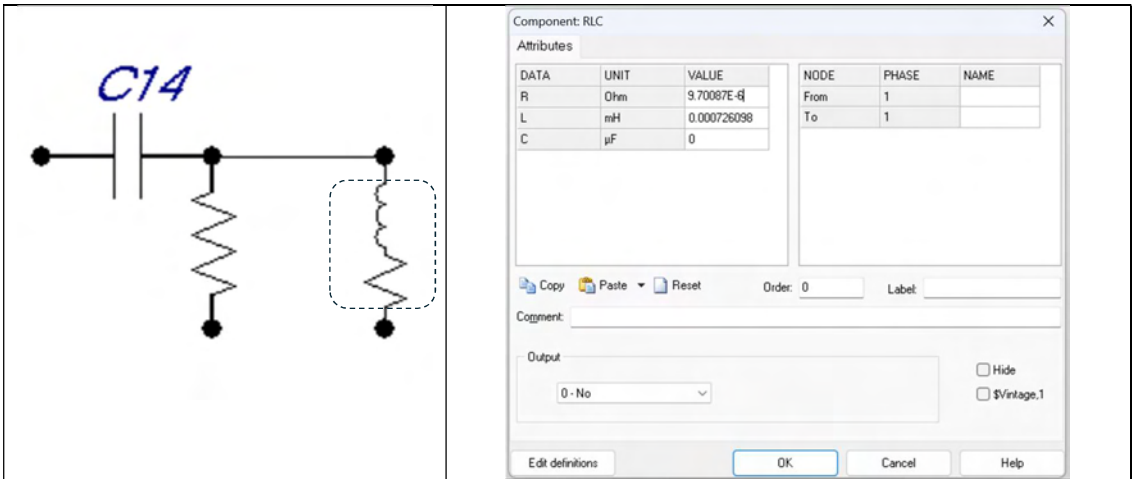
(α) (β)

Εικόνα 5-6: (α) Χωρητικότητα κάθε τμήματος με το έδαφος, (β) Στοιχείο CAP RS: Παράμετροι για το Τμήμα 14.



(α) (β)

Εικόνα 5-7: (α) Ωμική αντίσταση του σκυροδέματος κάθε τμήματος, (β) Στοιχείο RESISTOR: Παράμετροι για το Τμήμα 14.

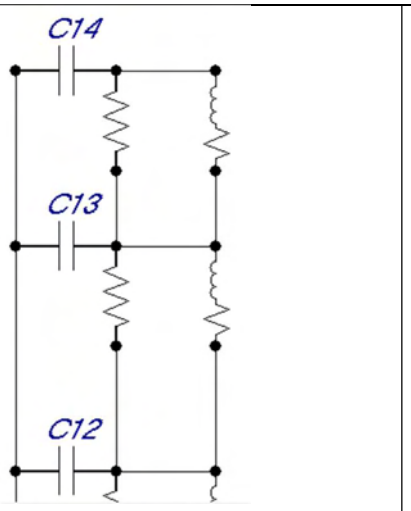


(α) (β)

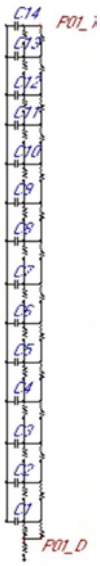
Εικόνα 5-8: (α) Ωμική και Επαγωγική αντίσταση πλέγματος χάλυβα κάθε τμήματος, (β) Στοιχείο RLC: Παράμετροι για το Τμήμα 14.

Οι παράμετροι στις εικόνες (β) (Εικόνα 5-6 (β), Εικόνα 5-7 (β) και Εικόνα 5-8 (β)) αφορούν το Τμήμα 14 κάθε στύλου. Για κάθε ένα από τα υπόλοιπα τμήματα οι παράμετροι έχουν ήδη υπολογισθεί στις παραγράφους 3.1.3 έως 3.1.6 και διαφέρουν από τμήμα σε τμήμα. Όμως, το ηλεκτρικό ισοδύναμο κάθε τμήματος είναι ακριβώς το ίδιο όπως για όλα τα τμήματα όπως στις εικόνες (α) (Εικόνα 5-6 (α), Εικόνα 5-7 (α) και Εικόνα 5-8 (α)).

Κάθε τμήμα είναι συνδεδεμένο με το επόμενο όπως στη λεπτομέρεια στην Εικόνα 5-9 (α). Ως αποτέλεσμα όλων των διαδοχικών συνδέσεων των επιμέρους τμημάτων θα λάβουμε τη συνολική συνδεσμολογία του στύλου, όπως στην Εικόνα 5-9 (β).



(α)



(β)

Εικόνα 5-9: (α) Σύνδεση των διαδοχικών τμημάτων 14, 13, 12, (β) Συνολική συνδεσμολογία στύλου.

5.2.4 Αντίσταση γείωσης στύλου

Στην Εικόνα 5-9 (β) μετά το τελευταίο τμήμα του στύλου φαίνεται ωμική αντίσταση που συνδέεται σε σειρά με τις παράλληλες αντιστάσεις του πλέγματος χάλυβα και σκυροδέματος του τελευταίου τμήματος. Αυτή η ωμική αντίσταση είναι η αντίσταση που εμφανίζει η γείωση του στύλου στο έδαφος. Η τιμή της αντίστασης αυτής επιλέχθηκε στα 70Ω.

5.2.5 Μονωτήρες εναέριας γραμμής

Η μοντελοποίηση των μονωτήρων εναέριας γραμμής αναλύθηκε λεπτομερώς στην παράγραφο 4.4. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα της παραγράφου 4.4.3 κρίθηκε ότι μεγαλύτερο ενδιαφέρον προς μελέτη κατά την προσομοίωση παρουσιάζουν τα μοντέλα μονωτήρων VT_I4 και LDM_I5.

5.2.6 Κρουστική γεννήτρια κεραυνικών πληγμάτων

Η μοντελοποίηση κρουστικής γεννήτριας για την προσομοίωση κεραυνικών πληγμάτων αναλύθηκε λεπτομερώς στην παράγραφο 4.2. Επιλέχθηκε στην τελική διάταξη να προσομοιωθεί συμβάν πρώτου κεραυνικού πλήγματος ακολουθούμενου από ένα Ακόλουθο στον 10^{ο} στύλο του δικτύου.

5.2.7 Εμπεδήσεις Προσαρμογής

Σύμφωνα με το (Short, 2004), όταν ένας κεραυνός εγχύει ρεύματα υπερτάσεως σε γραμμές μεταφοράς, αυτά ταξιδεύουν δια μέσου των αγωγών ως οδεύοντα κύματα. Η κατανόηση της

φύσης των οδεύοντων κυμάτων βοηθά στην πρόβλεψη των επιπέδων τάσεων και ρευμάτων που παράγονται στα ηλεκτρικά δίκτυα κατά τη διάρκεια κεραυνικών πληγμάτων. Οι υπερτάσεις ταξιδεύουν με ταχύτητα 99% της ταχύτητας του φωτός σε εναέρια δίκτυα (300m/μsec). Οι ομοιόμορφα καταμερισμένες επαγωγές και χωρητικότητες κατά μήκος της γραμμής καθορίζουν την ταχύτητα και τη σχέση μεταξύ τάσης και ρεύματος:

$$V = ZI$$

Η Z καλείται εμπέδηση υπέρτασης (surge impedance):

$$Z = 60\sqrt{\frac{L}{c}} = 60\ln\left(\frac{2h}{r}\right)$$

όπου:

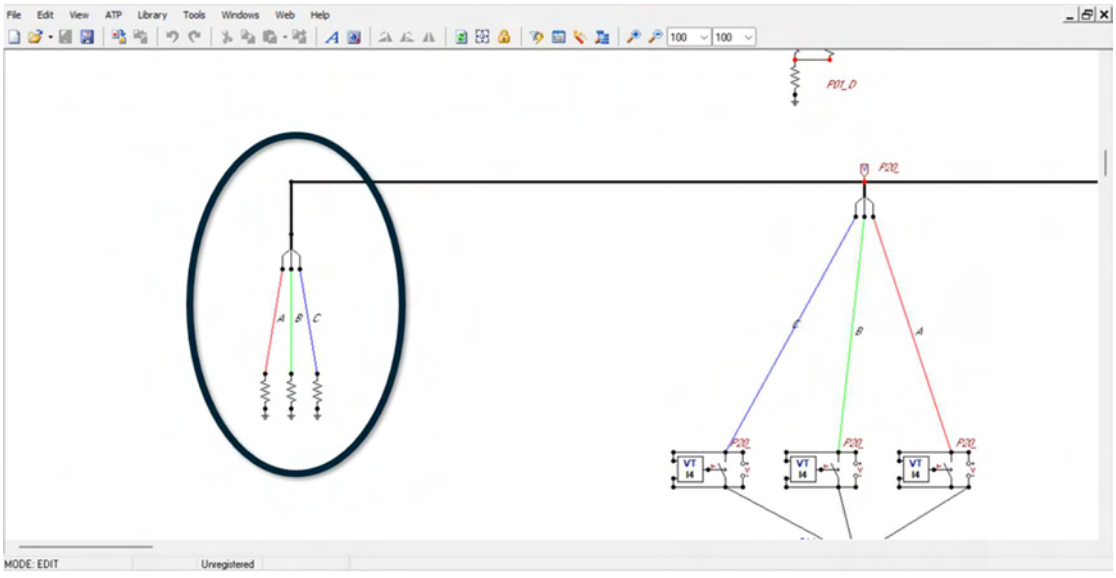
- h: το μέσος ύψος του αγωγού
  $h = V_{mid} = 13.33\ m$ (από την παράγραφο 3.2.5)
- r: η ακτίνα του αγωγού
  $r = 0.00516\ m$ (από την παράγραφο 3.2.3)

Συνήθως στο τερματικό άκρο ενός δικτύου μέσης τάσης συνδέεται είτε σε κάποιος μετασχηματιστής είτε σε κάποιον υποσταθμός. Ένα υψίσυχνο σήμα όπως ο κεραυνός αναιρεί την παράμετρο R της εμπέδησης Z στην οποία εμπίπτει, συνεπώς η εμπέδηση οποιασδήποτε ρεαλιστικής περίπτωσης μπορεί να μοντελοποιηθεί από τρεις εμπεδήσεις υπερτάσεων, μία για κάθε αγωγό φάσης. Αυτές οι εμπεδήσεις θα καλούνται στη συνέχεια, εμπεδήσεις προσαρμογής.

Άρα, οι εμπεδήσεις προσαρμογής έχουν τιμή:

$$Z = 60\ln\left(\frac{2h}{r}\right) = 60\ln\left(\frac{2 \times 13.33}{0.00516}\right) = 512.99\ \Omega$$

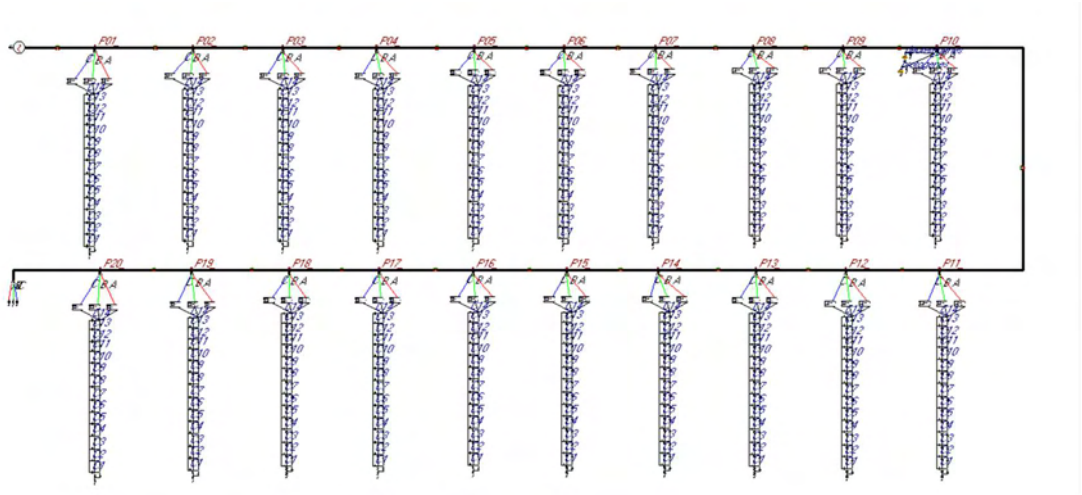
Στην Εικόνα 5-10 φαίνεται η συνδεσμολογία των εμπεδήσεων προσαρμογής στον τερματισμό της γραμμής μεταφοράς.



Εικόνα 5-10: Εμπεδήσεις προσαρμογής (μία ανά αγωγό φάσης)

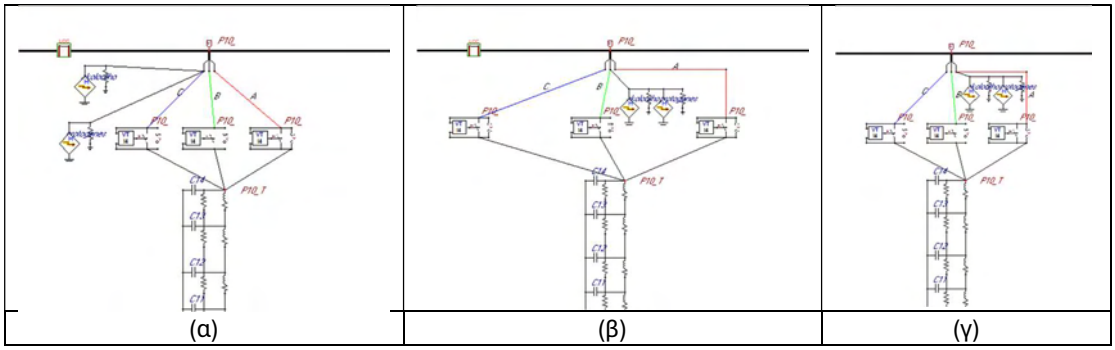
5.3 Συνολική διάταξη προσομοίωσης

Η συνολική διάταξη της προσομοίωσης περιλαμβάνει: μια τριφασική γεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης (όπως στην παράγραφο 5.2.1), είκοσι όμοιους στύλους (όπως στην παράγραφο 5.2.3), στην κορυφή κάθε στύλου ένα μοντέλο μονωτήρα VT-I4 ανά φάση (όπως στην παράγραφο 4.4.1), δηλαδή τρία ανά στύλο και εξήντα συνολικά, είκοσι όμοια τμήματα γραμμών μεταφοράς μήκους 100 m το κάθε ένα ανάμεσα σε κάθε ζεύγος διαδοχικών στύλων (όπως στην παράγραφο 5.2.2) και τρεις εμπεδήσεις προσαρμογής στο τερματικό σημείο του δικτύου (όπως στην παράγραφο 5.2.7). Στην Εικόνα 5-11 φαίνεται η τελική διάταξη προσομοίωσης. Τα κεραυνικά πλήγματα, ένα πρώτο και ένα ακόλουθο (όπως στην παράγραφο 4.2) εφαρμόζονται στον 10ο στύλο του δικτύου.



Εικόνα 5-11: Συνολική διάταξη προσομοίωσης.

Στην Εικόνα 5-12 φαίνεται η εφαρμογή των κεραυνικών πλημμάτων στην κορυφή του 10ου στύλου (α) στη φάση C, (β) στη φάση B και (γ) στη φάση A. Κατά τη διάρκεια των αρχικών δοκιμών λαμβάναμε αποτελέσματα που δεν ήταν συμβατά με τα αναμενόμενα. Αυτό συνέβαινε λόγω επικαλύψεων των καλωδίων σύνδεσης των πλημμάτων με άλλα στοιχεία του κυκλώματος που προκαλούσαν προβλήματα στην αντίληψη του ATPDraw που δεν ήταν εμφανή από το σχεδιασμό του κυκλώματος. Για αυτό το λόγο δίνουμε τις λεπτομέρειες των συνδέσεων των πλημμάτων ανά φάση, όπως στην Εικόνα 5-12.



Εικόνα 5-12: Εφαρμογή των κεραυνικών πλημμάτων στην κορυφή του 10ου στύλου (α) στη φάση C, (β) στη φάση B και (γ) στη φάση A.

6 Κεφάλαιο: Προσομοίωση

6.1 Σενάρια προσομοίωσης

Είναι εμφανές ότι με χρήση της τελικής διάταξης (παράγραφος 5.3) μπορεί να προσομοιωθεί μεγάλο πλήθος σεναρίων και να εξαχθούν πολλαπλά και ενδιαφέροντα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του δικτύου κατά τη διάρκεια κεραυνικών πληγμάτων.

Από τα σενάρια αυτά επιλέχθηκαν και προσομοιώθηκαν αυτά όπως στον Πίνακας 6-1.

Πίνακας 6-1: Σενάρια δοκιμών προσομοίωσης.

	Πρώτο πλήγμα	Ακόλουθο πλήγμα	Στη φάση 10ου στύλου
Σενάριο 1 (K.2.a_A)	I_{max} = 35 (kA) T_1/T_2 = 6/78 (μs/ μs)	I_{max} = 12 (kA) T_1/T_2 = 1/30 (μs/ μs)	A
Σενάριο 2 (K.2.a_B)	I_{max} = 35 (kA) T_1/T_2 = 6/78 (μs/ μs)	I_{max} = 12 (kA) T_1/T_2 = 1/30 (μs/ μs)	B
Σενάριο 3 (K.2.a_C)	I_{max} = 35 (kA) T_1/T_2 = 6/78 (μs/ μs)	I_{max} = 12 (kA) T_1/T_2 = 1/30 (μs/ μs)	C
Σενάριο 4 (K.2.b_A)	I_{max} = 100 (kA) T_1/T_2 = 1/200 (μs/ μs)	I_{max} = 50 (kA) T_1/T_2 = 0.25/100 (μs/ μs)	A
Σενάριο 5 (K.2.b_B)	I_{max} = 100 (kA) T_1/T_2 = 1/200 (μs/ μs)	I_{max} = 50 (kA) T_1/T_2 = 0.25/100 (μs/ μs)	B
Σενάριο 6 (K.2.b_C)	I_{max} = 100 (kA) T_1/T_2 = 1/200 (μs/ μs)	I_{max} = 50 (kA) T_1/T_2 = 0.25/100 (μs/ μs)	C

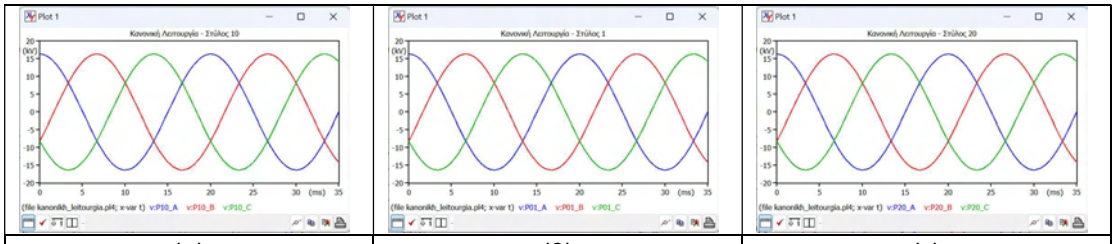
Κρίθηκε ότι τα σενάρια αυτά είναι αντιπροσωπευτικά και καλύπτουν ικανό εύρος περιπτώσεων καθώς περιλαμβάνουν σενάρια δοκιμών για: (α) πλήγματα με τιμές από στατιστικά δεδομένα πραγματικών πληγμάτων (K.2.a), (β) πλήγματα με τιμές από τις προβλέψεις των προτύπων (K.2.b) που είναι απαιτητικότερα των στατιστικών δεδομένων, (γ) πλήγματα σε διαφορετικές φάσεις του δικτύου.

Για κάθε ένα από αυτά τα σενάρια παρατηρήθηκαν από τις γραφικές παραστάσεις τα:

- ***Χρόνος αποκατάστασης***: ο χρόνος από τη στιγμή που εφαρμόστηκε το πλήγμα έως τη στιγμή που οι τάσεις και στις τρεις φάσεις του δικτύου επανήλθε στις κανονικές τιμές.
- ***Μέγιστες τιμές τάσης και χρόνοι εμφάνισής τους (ανά φάση) στους P10, P01, P20***: οι μέγιστες τιμές των τάσεων που έλαβε κάθε φάση ως αποτέλεσμα του πλήγματος είτε αυτό ήταν πρώτο είτε ακόλουθο. Καταγράφηκε ο χρόνος εμφάνισης των μεγίστων τιμών. Οι τιμές αυτές των τάσεων και χρόνων καταγράφηκαν για τον 10ο στύλο (P10), δηλαδή για το στύλο που εφαρμόζεται το πλήγμα και για τους στύλους 1ο (P01) και 20ο (P20), δηλαδή για τους δύο ακραίους στύλους στο δίκτυο.
- ***Ελάχιστες τιμές τάσης και χρόνοι εμφάνισής τους (ανά φάση) στους P10, P01, P20***: (ομοίως με τις μέγιστες ανωτέρω).

6.2 Κανονική Λειτουργία

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του δικτύου χωρίς την επίδραση κεραυνικών πληγμάτων φαίνονται στο Σχήμα 6-1.



(α)	(β)	(γ)

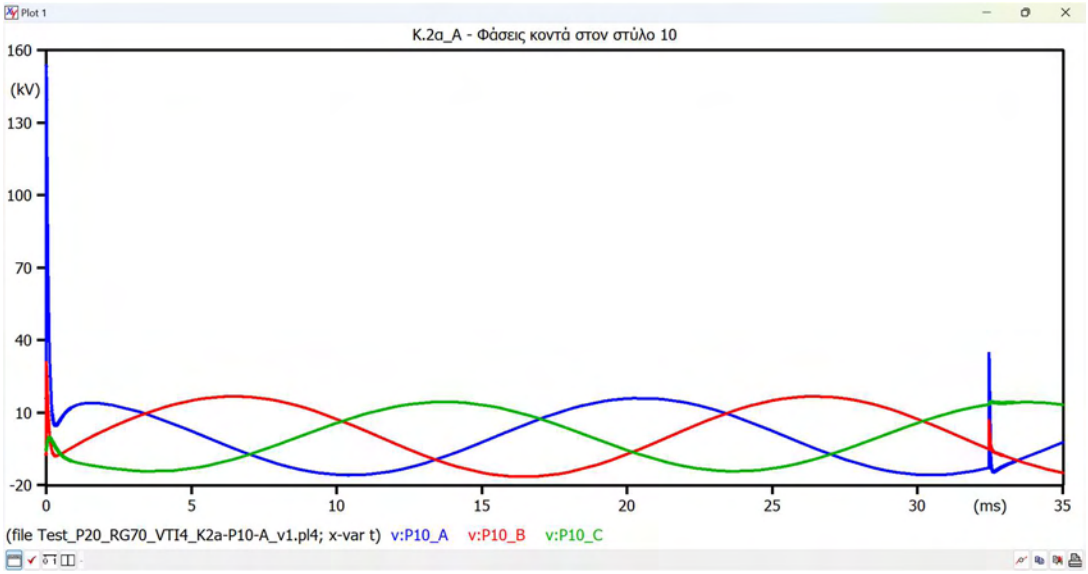
Σχήμα 6-1 Κανονική λειτουργία: (α) Στύλος P10, (β) Στύλος P01, (γ) Στύλος P20

6.3 Δοκιμές

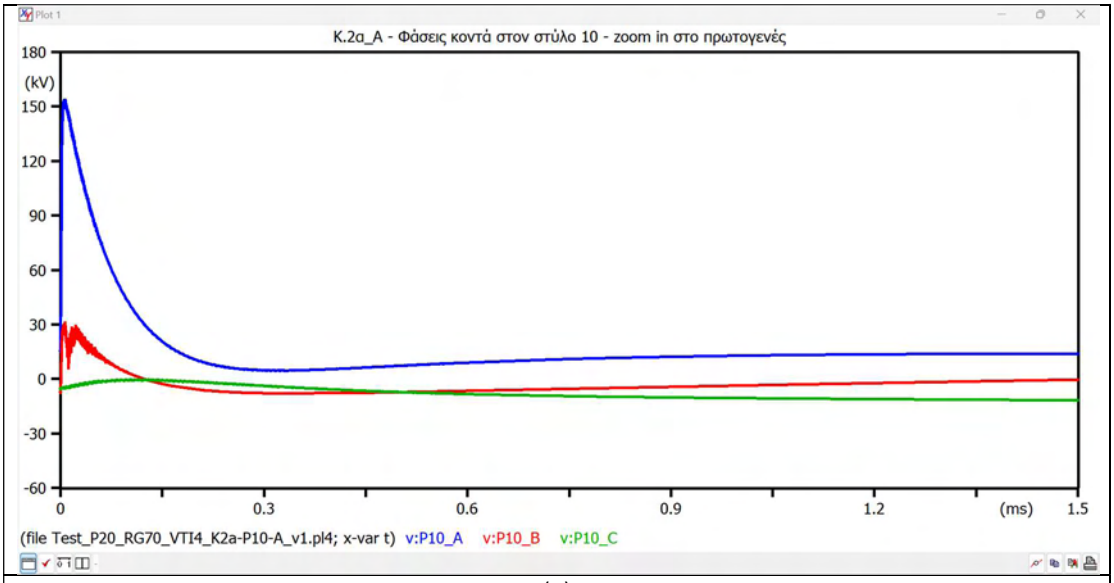
6.3.1 Σενάριο 1 (K.2.a_A)

K.2.a_A: Κεραυνικό Πρώτο πλήγμα ρεύματος κορυφής 35 kA και διαρκειών μετώπου/ουράς= 6/78 μs ακολουθούμενο από Ακόλουθο κεραυνικό πλήγμα ρεύματος κορυφής 12 kA και διαρκειών μετώπου/ουράς 1/30 μs (K.2a), στη φάση A του 10^{ου} στύλου του δικτύου.

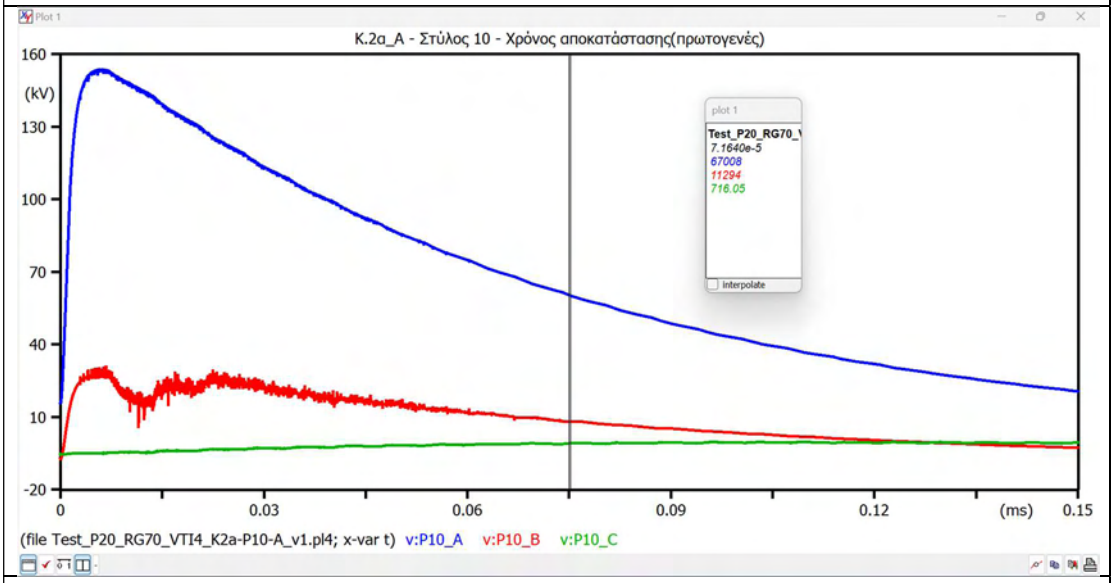
Σενάριο 1 (K.2.a_A) - Στύλος P10



Σενάριο 1 (Κ.2.α_Α) - Στύλος P10: Πρώτο Πλήγμα

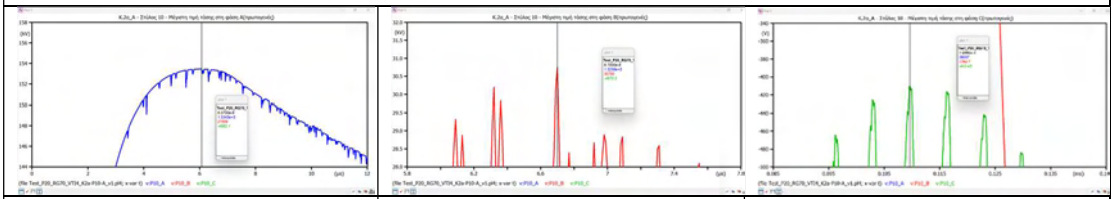


(α)



Χρόνος αποκατάστασης 0,00007164 s μετά το πλήγμα

(β)

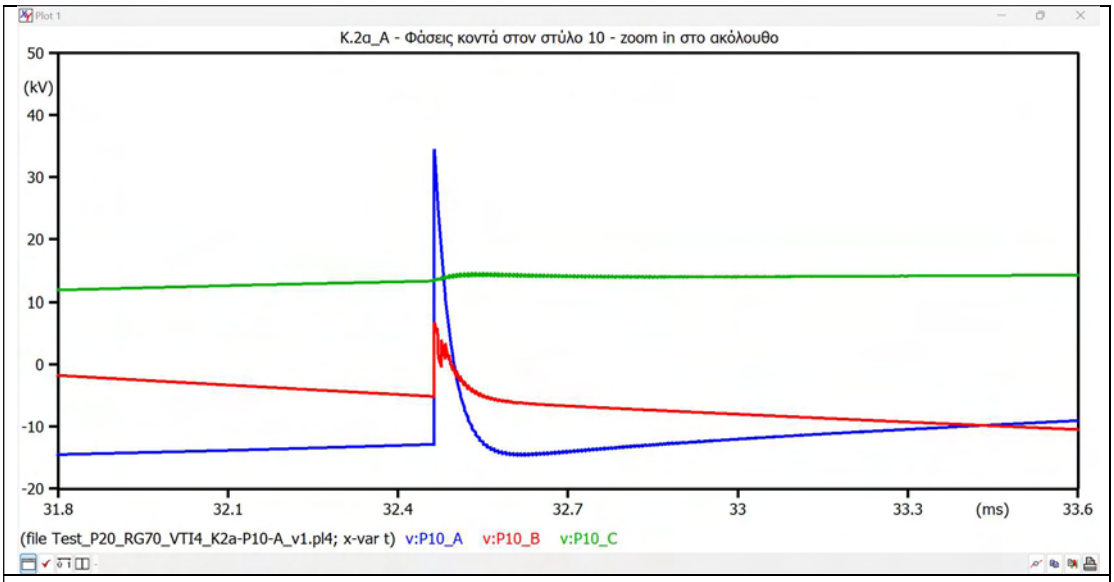


Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
153,450 kV	6,070 μs	30,750 kV	6,700 μs	-0,410 kV	109,600 μs

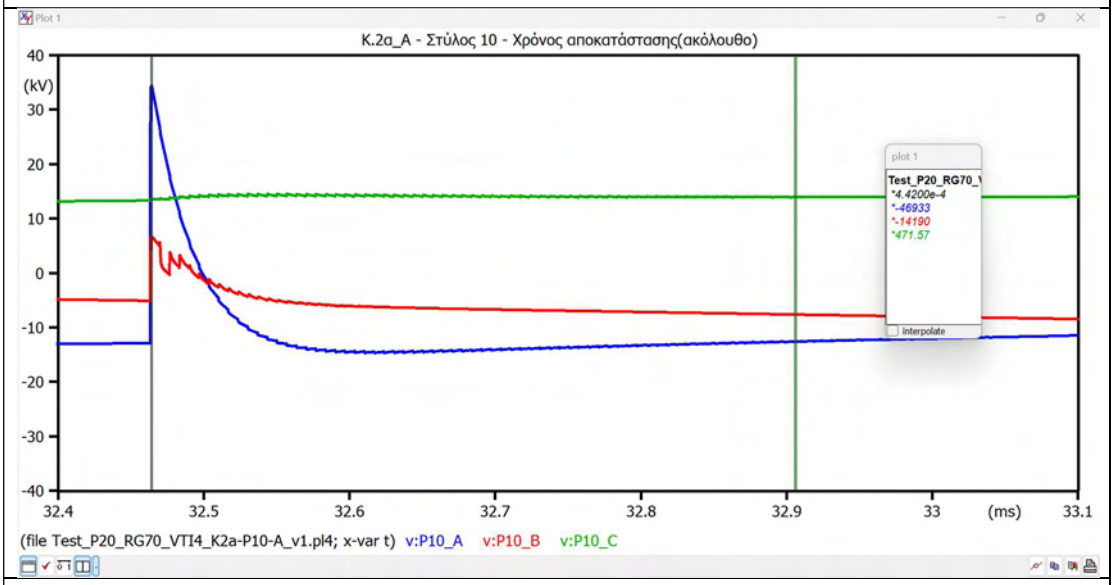
(γ)

Σχήμα 6-2 Στύλος P10: (α) Πρώτο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες τιμές ανά φάση (Κ.2.α_Α)

Σενάριο 1 (Κ.2.α_Α) - Στύλος P10: Ακόλουθο Πλήγμα

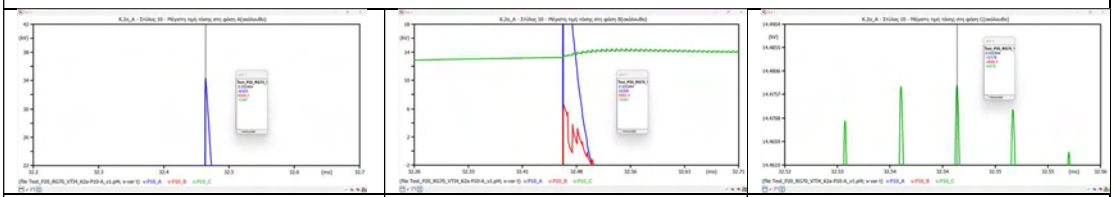


(α)



Χρόνος αποκατάστασης 0,000442 s μετά το πλήγμα

(β)

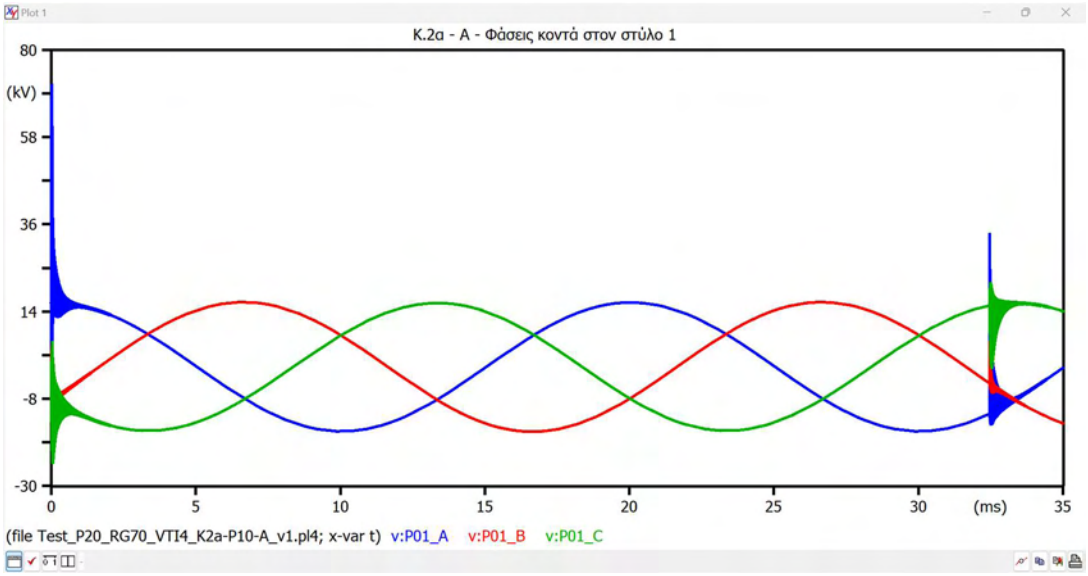


Φάση A		Φάση B		Φάση C	
34,305 kV	32,464 ms	6,562 kV	32,464 ms	14,478 kV	32,544 ms

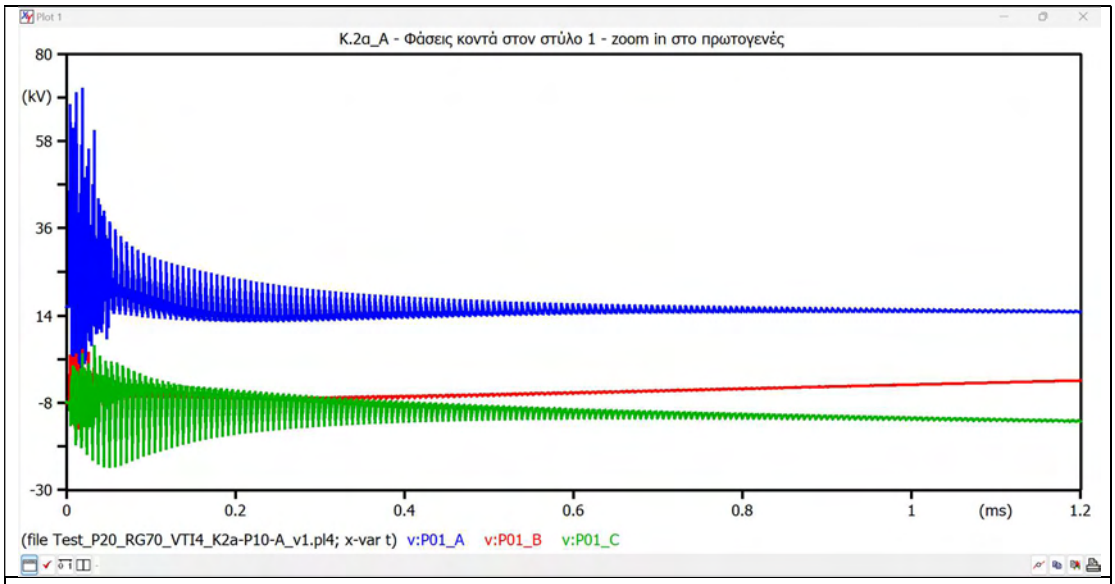
(γ)

Σχήμα 6-3 Στύλος P10: (α) Ακόλουθο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες τιμές ανά φάση (Κ.2.α_Α)

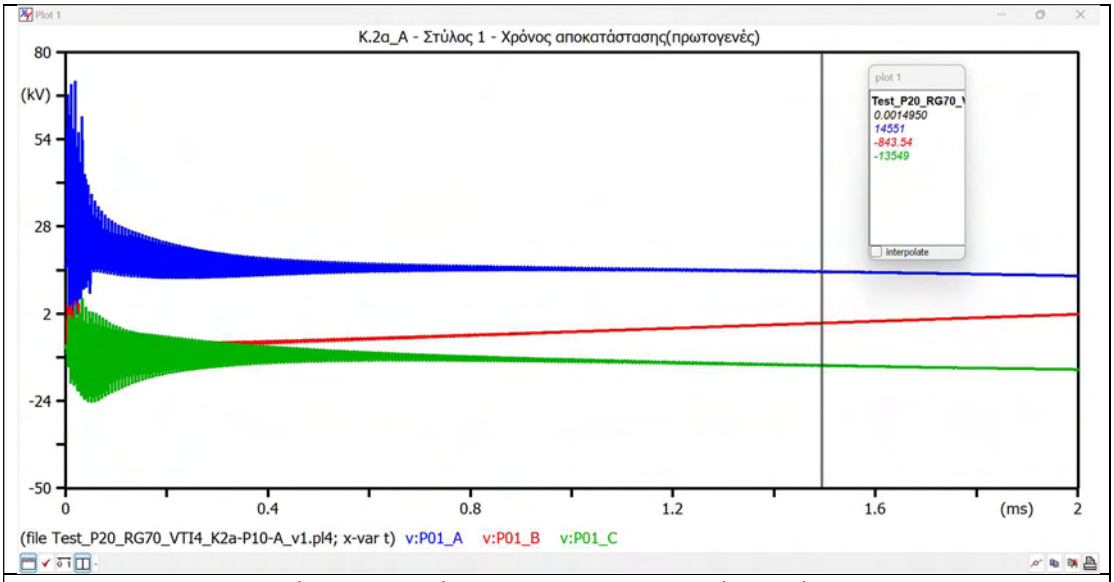
Σενάριο 1 (Κ.2.α_Α) - Στύλος Ρ01



Σενάριο 1 (Κ.2.α_Α) - Στύλος Ρ01: Πρώτο Πλήγμα

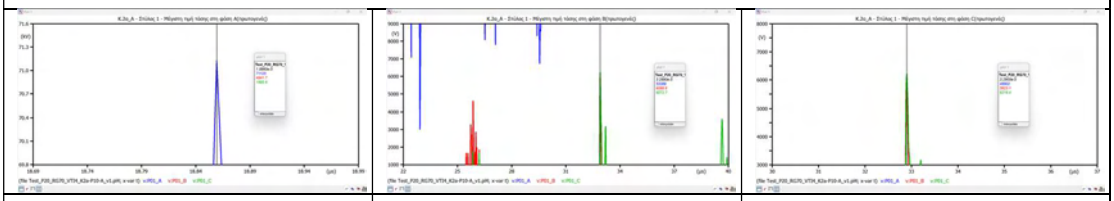


(α)



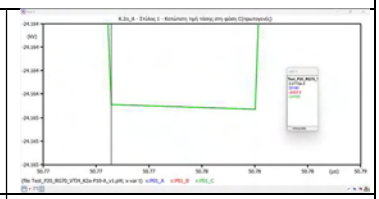
Χρόνος αποκατάστασης 0,001495 s μετά το πλήγμα

(β)



Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
71,125 kV	18,860 μs	6,089 kV	32,890 μs	6,218 kV	32,900 μs

(γ)

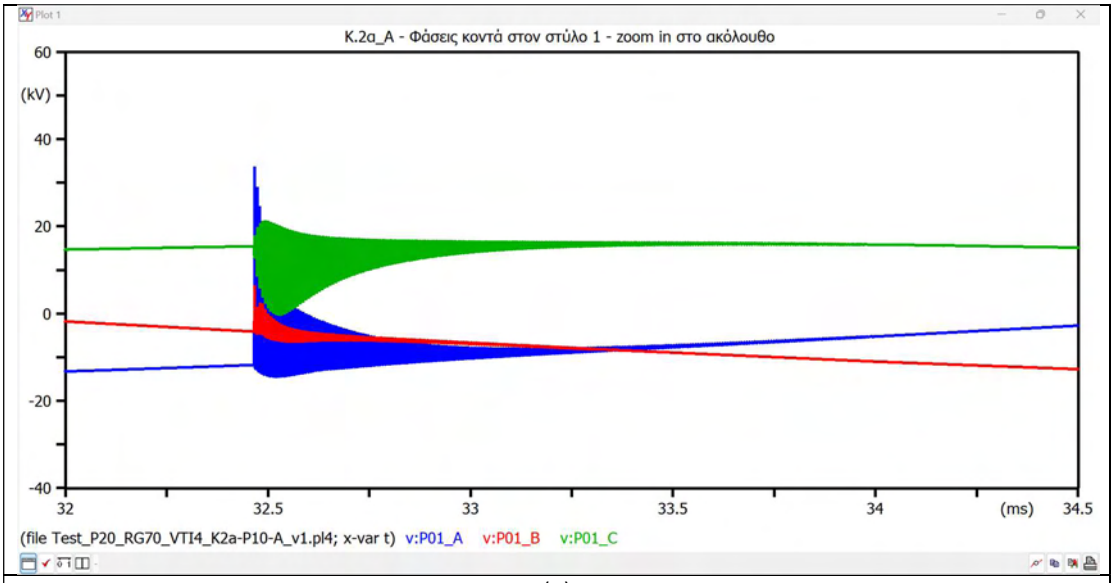


Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
				-24,165 kV	50,770 μs

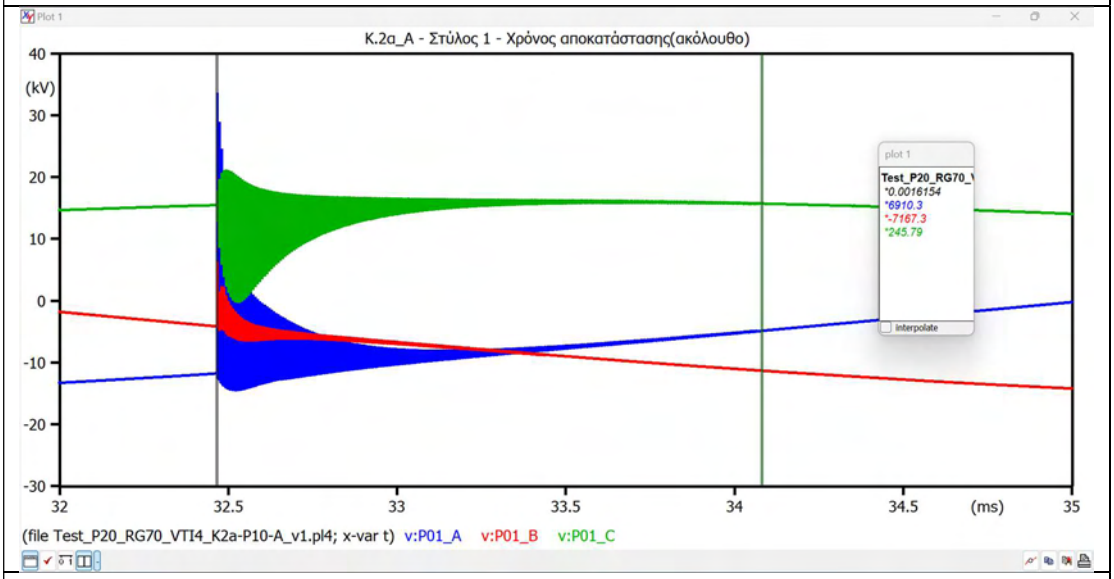
(δ)

Σχήμα 6-4 Στύλος P01: (α) Πρώτο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες και (δ) Κατώτατες τιμές ανά φάση (K.2.α_A)

Σενάριο 1 (Κ.2.α_Α) - Στύλος P01: Ακόλουθο Πλήγμα

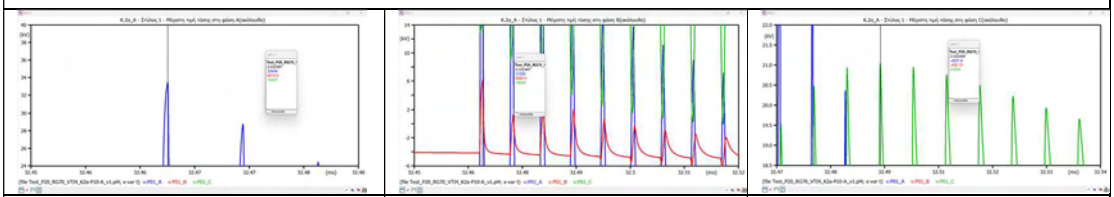


(α)



Χρόνος αποκατάστασης 0,0016154 s μετά το πλήγμα

(β)

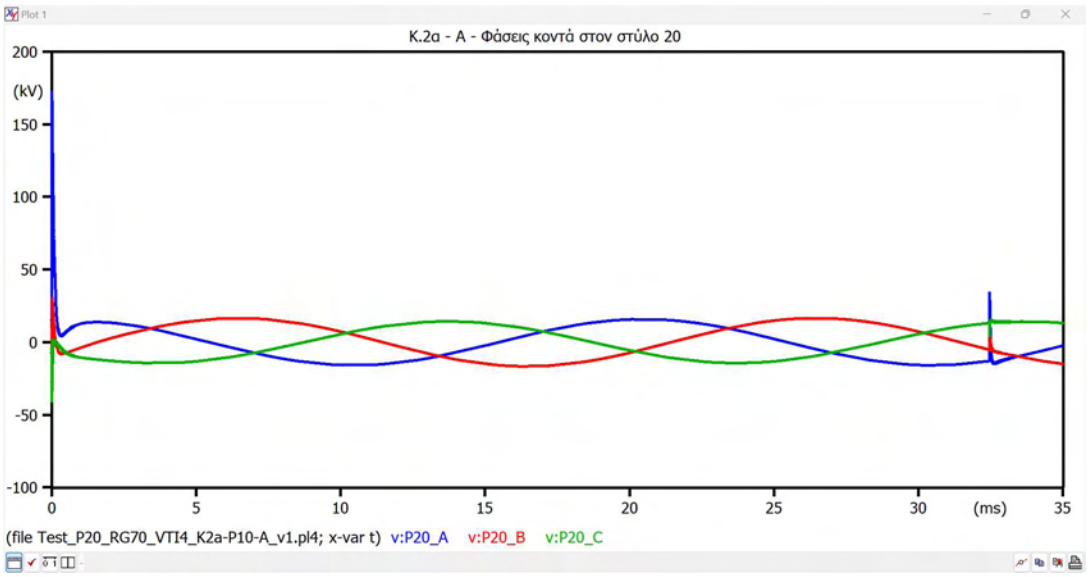


Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
33,444 kV	32,467 ms	6,093 kV	32,467 ms	21,024 kV	32,494 ms

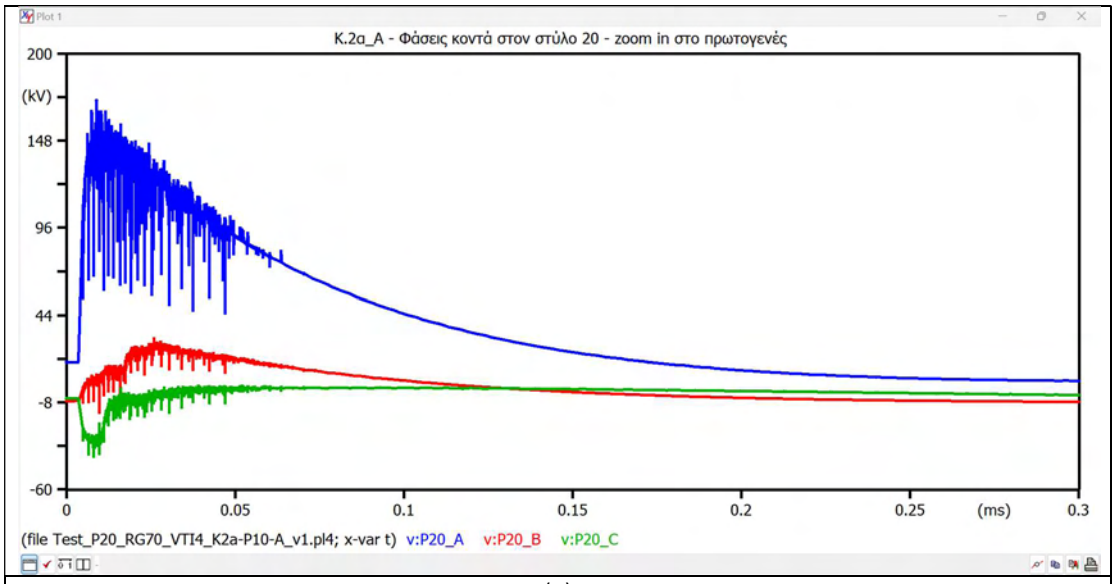
(γ)

Σχήμα 6-5 Στύλος P01: (α) Ακόλουθο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες τιμές ανά φάση (Κ.2.α_Α)

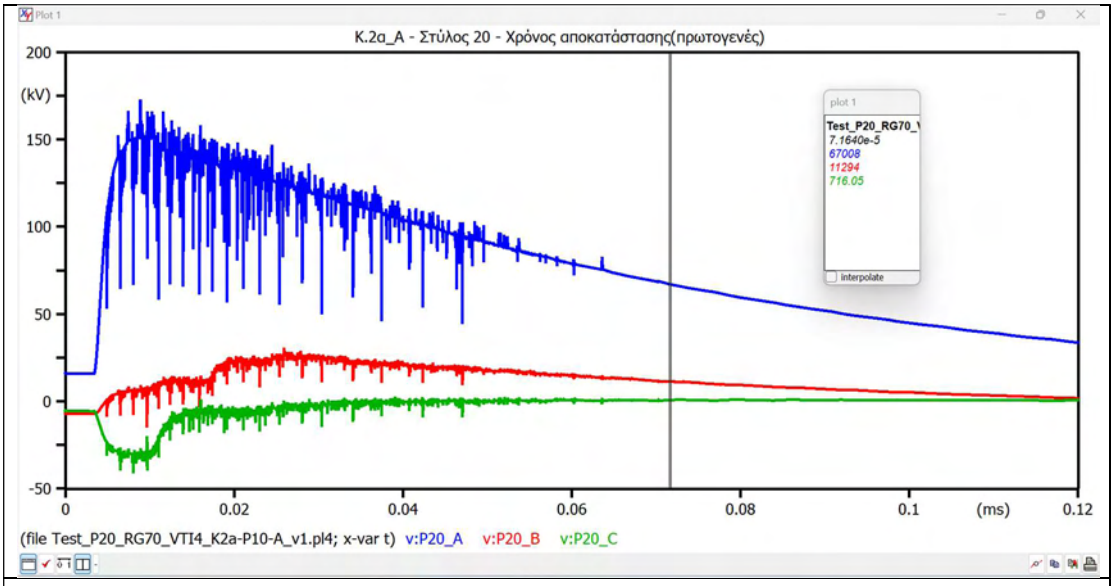
Σενάριο 1 (Κ.2.α_Α) - Στύλος Ρ20



Σενάριο 1 (Κ.2.α_Α) - Στύλος Ρ20: Πρώτο Πλήγμα

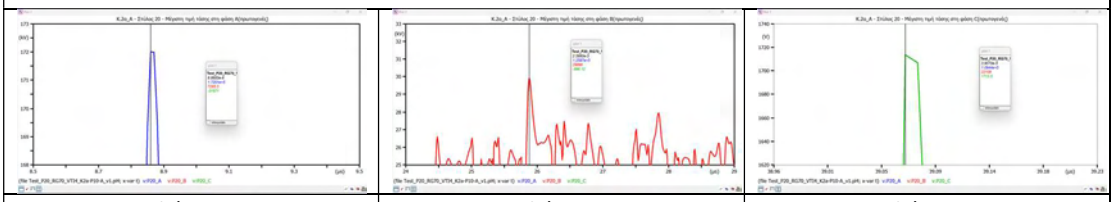


(α)



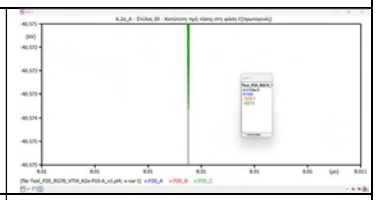
Χρόνος αποκατάστασης 0,00007164 s μετά το πλήγμα

(β)



Φάση A		Φάση B		Φάση C	
172,010 kV	88,600 μs	29,896 kV	25,880 μs	1,714 kV	39,070 μs

(γ)

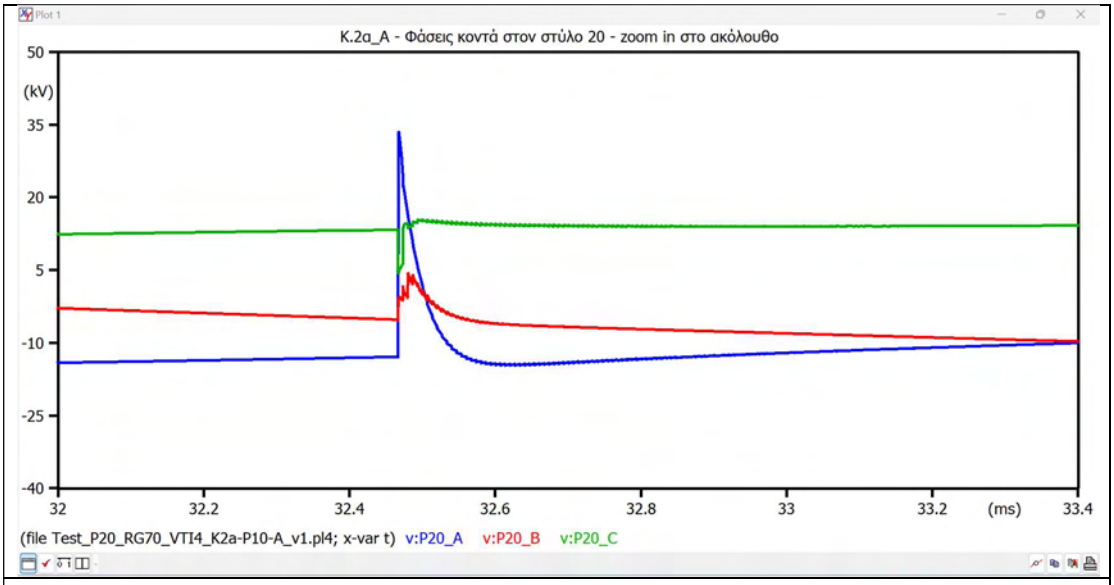


Φάση A		Φάση B		Φάση C	
				-40,574 kV	8,010 μs

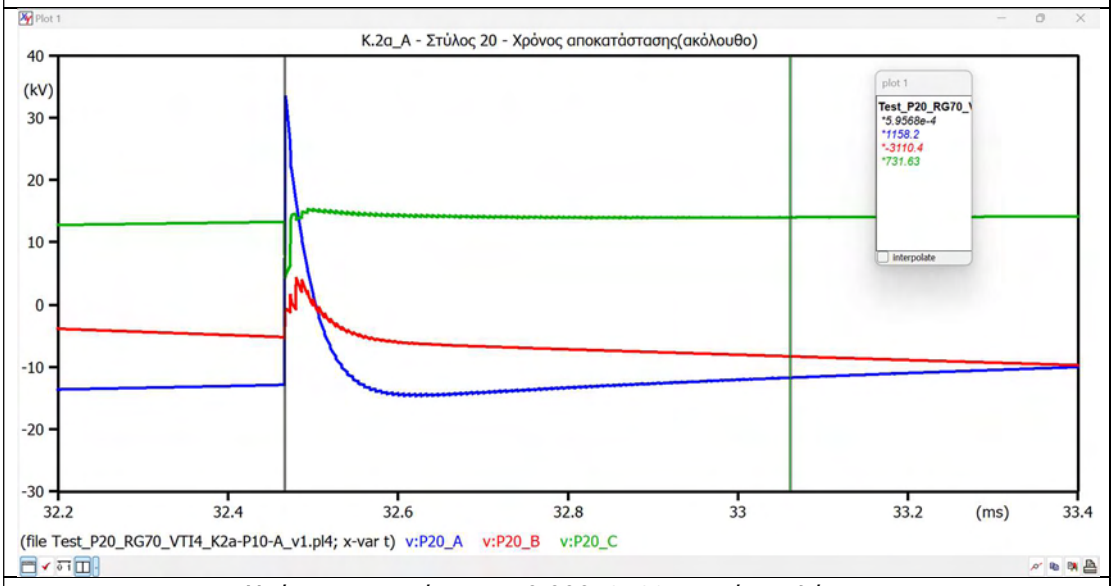
(δ)

Σχήμα 6-6 Στύλος P20: (α) Πρώτο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες και (δ) Κατώτατες τιμές ανά φάση (K.2.α_A)

Σενάριο 1 (Κ.2.α_Α) - Στύλος P20: Ακόλουθο Πλήγμα

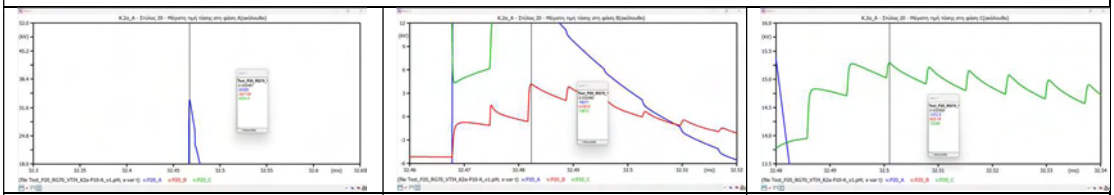


(α)



Χρόνος αποκατάστασης 0,00059568 s μετά το πλήγμα

(β)



Φάση A		Φάση B		Φάση C	
33,355 kV	32,467 ms	4,149 kV	32,480 ms	15,288 kV	32,500 ms

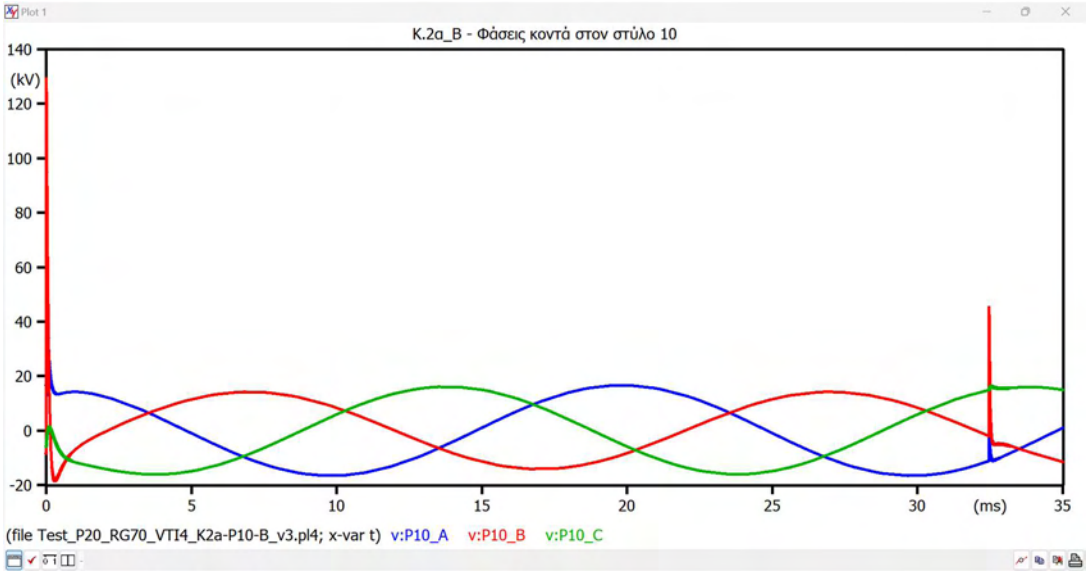
(γ)

Σχήμα 6-7 Στύλος P20: (α) Ακόλουθο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες τιμές ανά φάση (Κ.2.α_Α)

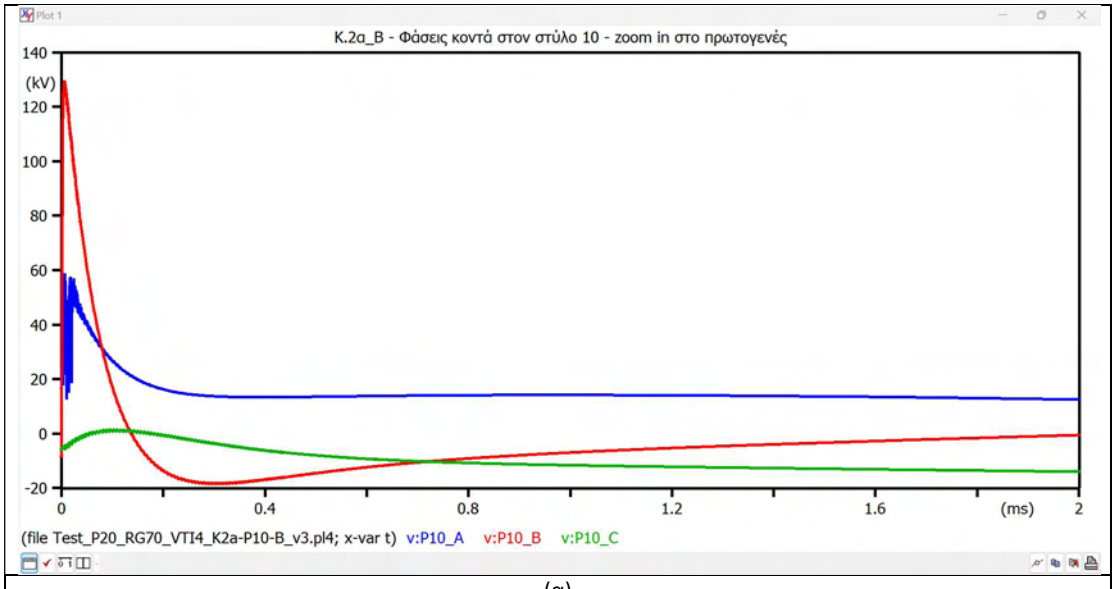
6.3.2 Σενάριο 2 (K.2.a_B)

K.2.a_B: Κεραυνικό Πρώτο πλήγμα ρεύματος κορυφής 35 kA και διαρκειών μετώπου/ουράς= 6/78 μs ακολουθούμενο από Ακόλουθο κεραυνικό πλήγμα ρεύματος κορυφής 12 kA και διαρκειών μετώπου/ουράς= 1/30 μs (K.2α), στη φάση B του 10^{ου} στύλου του δικτύου.

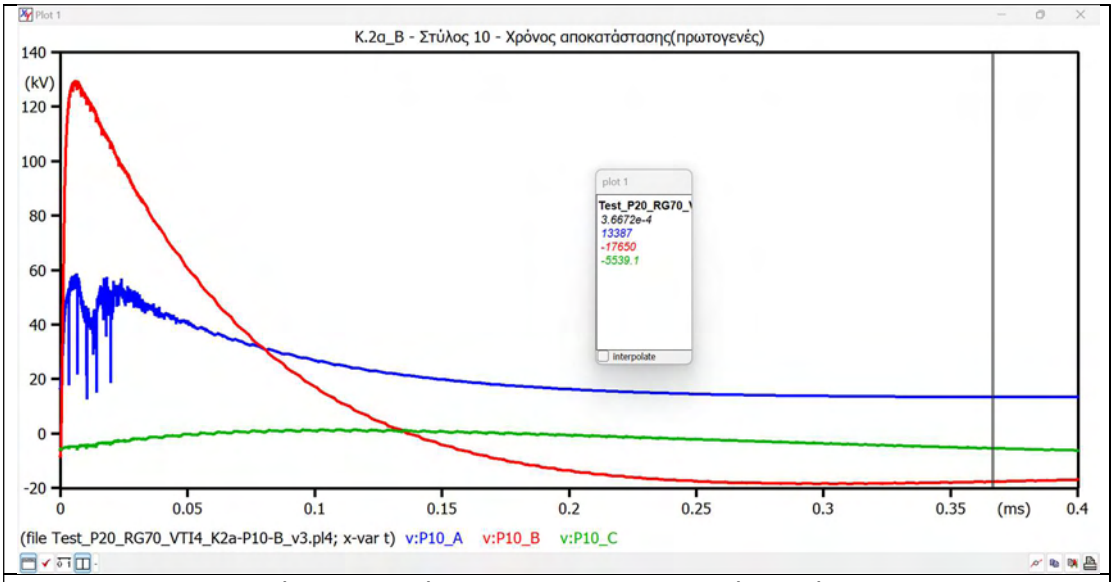
Σενάριο 2 (K.2.a_B) - Στύλος P10



Σενάριο 2 (K.2.a_B) - Στύλος P10: Πρώτο Πλήγμα

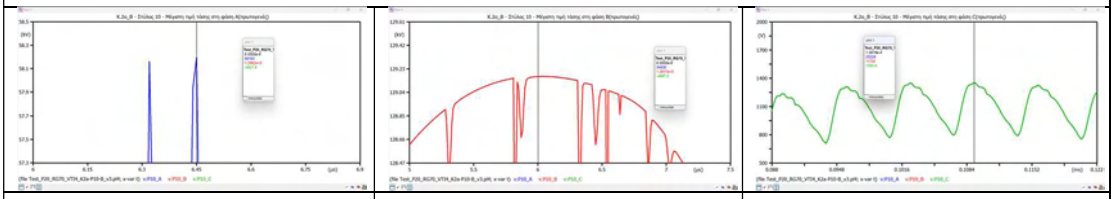


(α)



Χρόνος αποκατάστασης 0,00036672 s μετά το πλήγμα

(β)

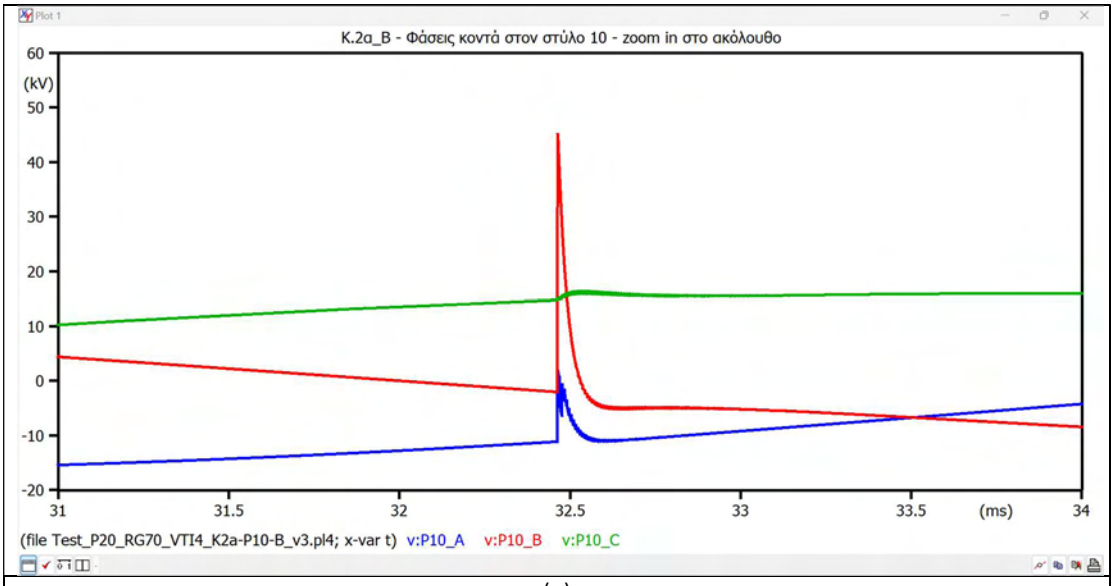


Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
58,193 kV	6,450 μs	129,170 kV	6,000 μs	1,351 kV	109,160 μs

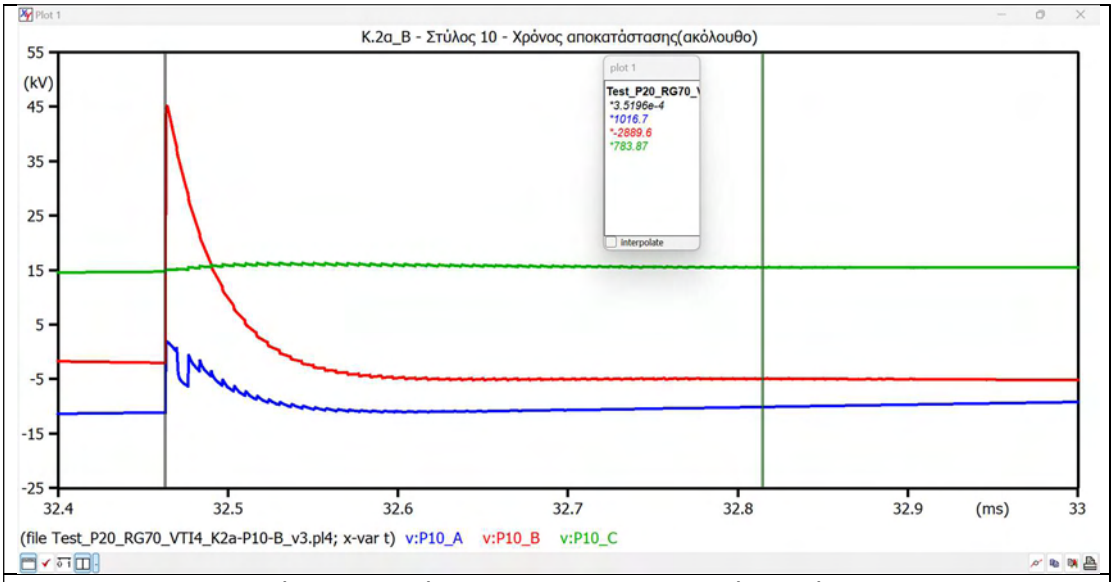
(γ)

Σχήμα 6-8 Στύλος P10: (α) Πρώτο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες τιμές ανά φάση (K.2.a_B)

Σενάριο 2 (K.2.α_B) - Στύλος P10: Ακόλουθο Πλήγμα

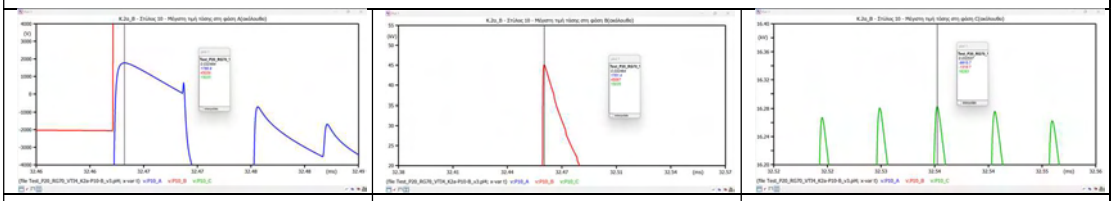


(α)



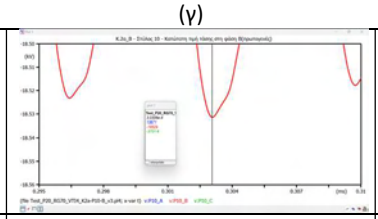
Χρόνος αποκατάστασης 0,00021624 s μετά το πλήγμα

(β)



Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
1,767 kV	32,464 ms	45,067 kV	32,464 ms	16,283 kV	32,537 ms

(γ)

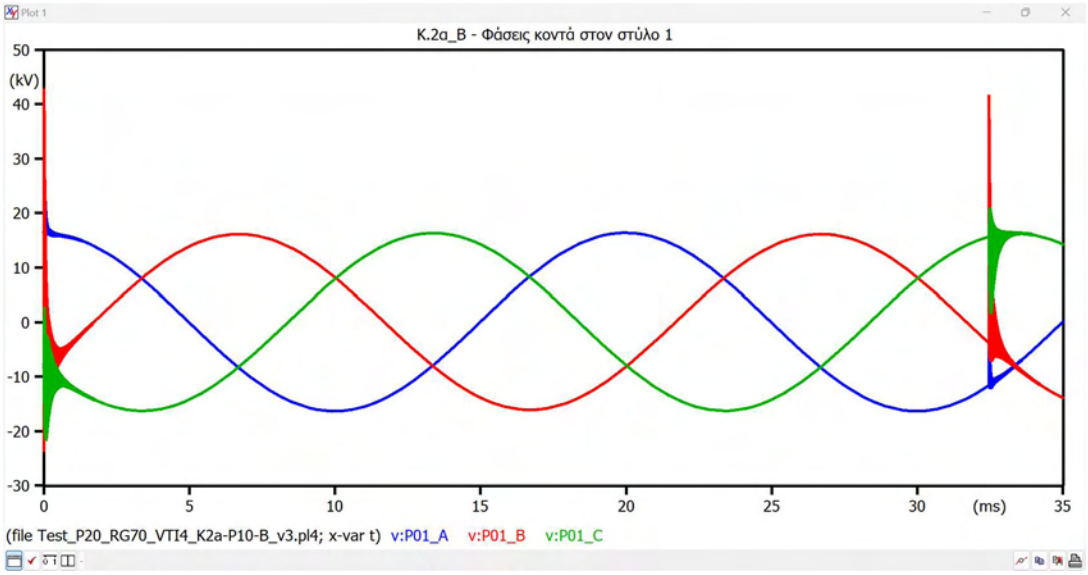


Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
		-18,529 kV	0,303 ms		

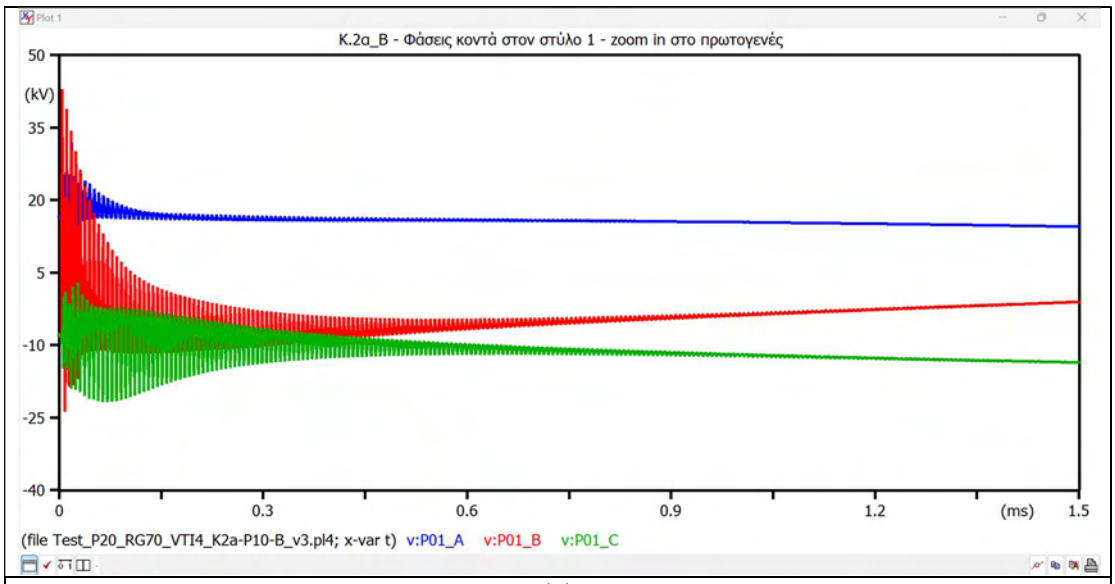
(δ)

Σχήμα 6-9 Στύλος P10: (α) Ακόλουθο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες και (δ) Κατώτατες τιμές ανά φάση (K.2.a_B)

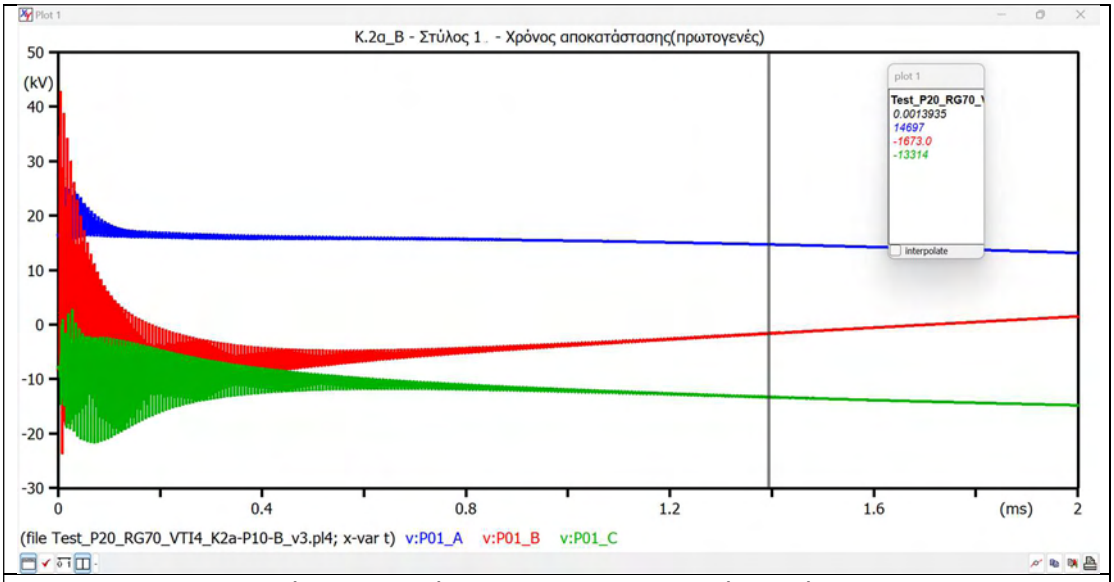
Σενάριο 2 (Κ.2.α_Β) - Στύλος Ρ01



Σενάριο 2 (Κ.2.α_Β) - Στύλος Ρ01: Πρώτο Πλήγμα

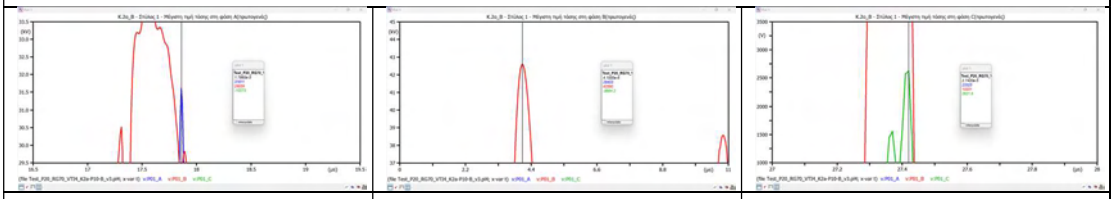


(α)



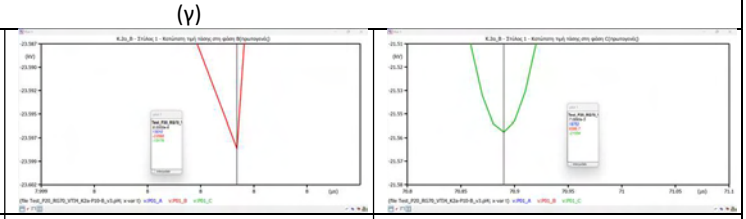
Χρόνος αποκατάστασης 0,0013935s μετά το πλήγμα

(β)



Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
31,611 kV	17,860 μs	42,590 kV	4,100 μs	2,622 kV	27,420 μs

(γ)

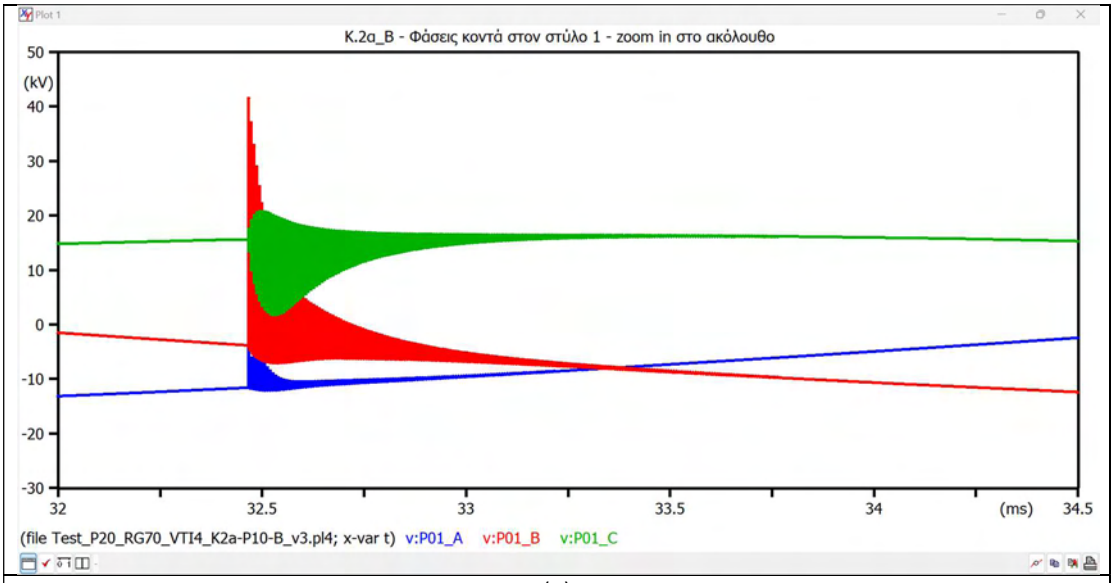


Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
		-23,598 kV	8,000 μs	-21,554 kV	7,089 μs

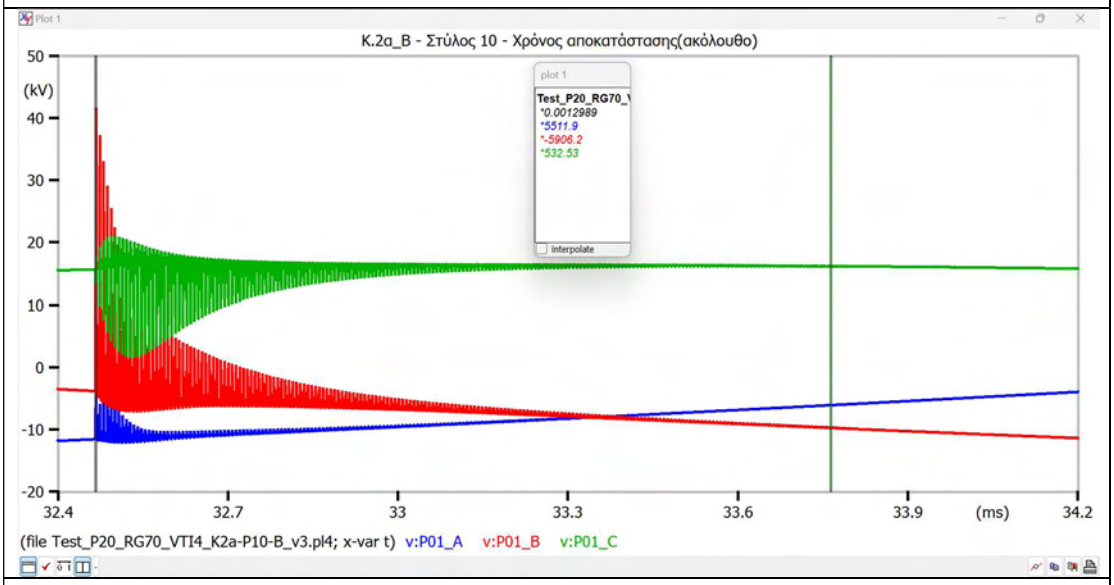
(δ)

Σχήμα 6-10 Στύλος P01: (α) Πρώτο πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες και (δ) Κατώτατες τιμές ανά φάση (K.2.a_B)

Σενάριο 2 (Κ.2.α_Β) - Στύλος Ρ01: Ακόλουθο Πλήγμα

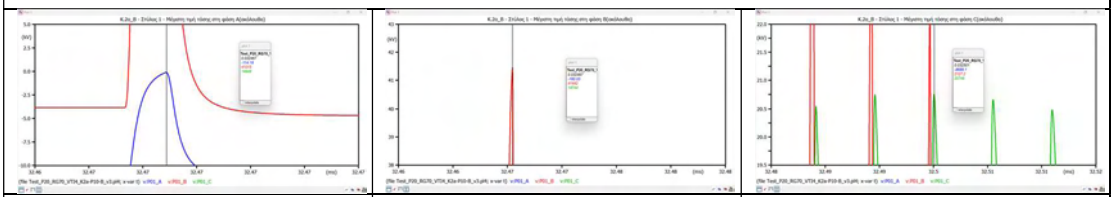


(α)



Χρόνος αποκατάστασης 0,0012989 s μετά το πλήγμα

(β)

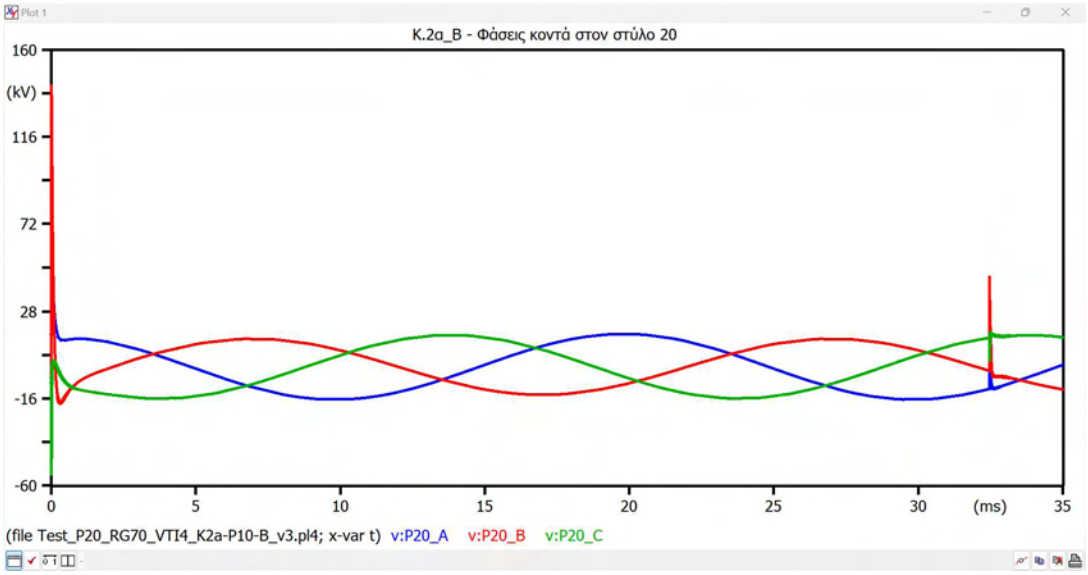


Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
-0,114 kV	32,467 ms	41,442 kV	32,467 ms	20,748 kV	32,501 ms

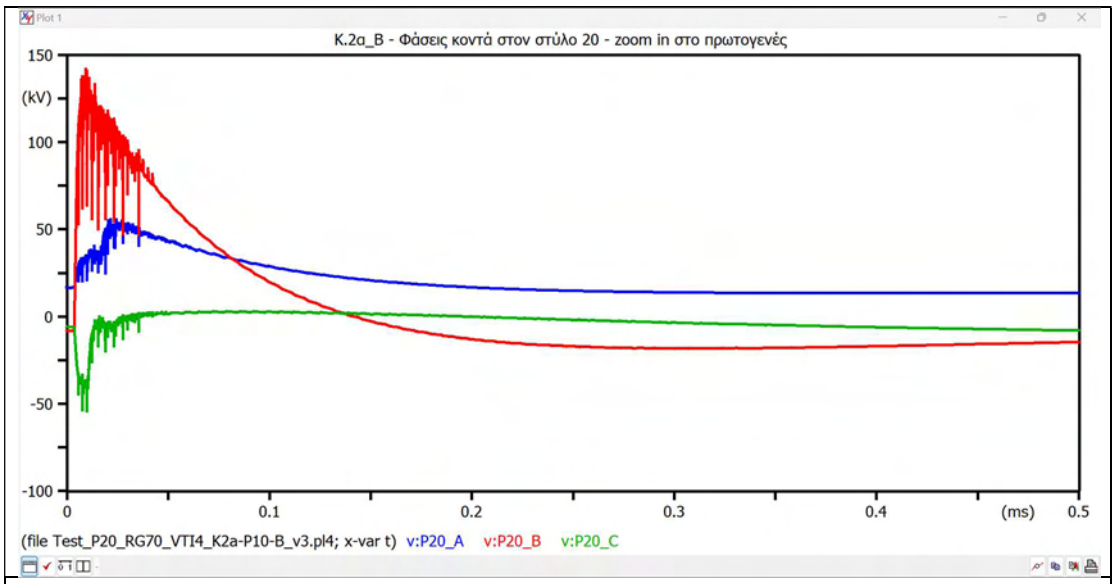
(γ)

Σχήμα 6-11 Στύλος Ρ01: (α) Ακόλουθο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες τιμές ανά φάση (Κ.2.α_Β)

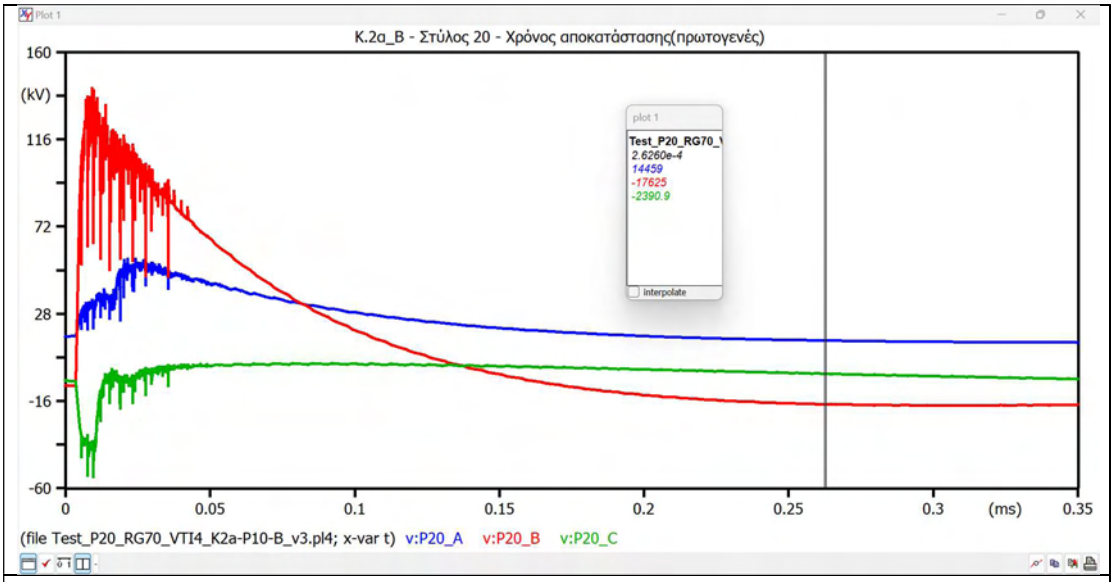
Σενάριο 2 (Κ.2.α_Β) - Στύλος P20



Σενάριο 2 (Κ.2.α_Β) - Στύλος P20: Πρώτο Πλήγμα

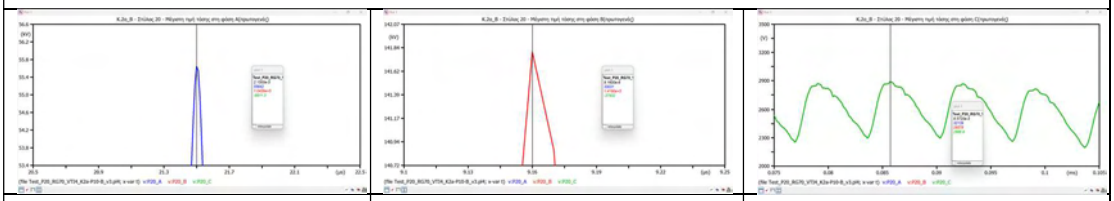


(α)



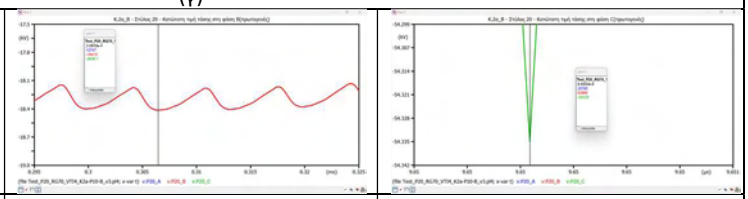
Χρόνος αποκατάστασης 0,0002626 s μετά το πλήγμα

(β)



Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
55,642 kV	21,500 μs	141,800 kV	9,160 μs	2,887 kV	85,720 μs

(γ)

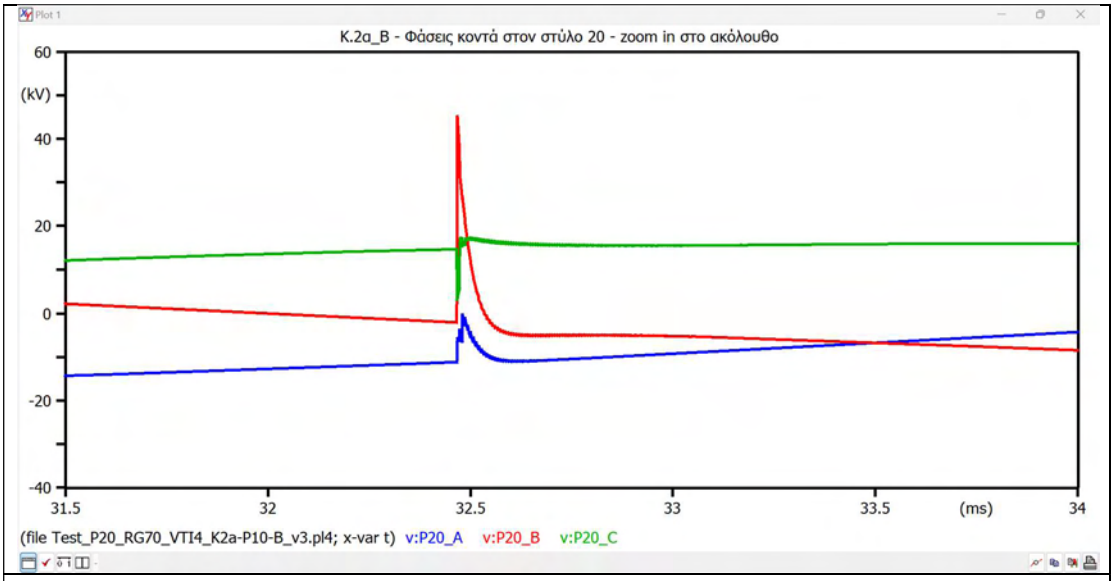


Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
		-18,415 kV	306,450 μs	-54,335 kV	9,650 μs

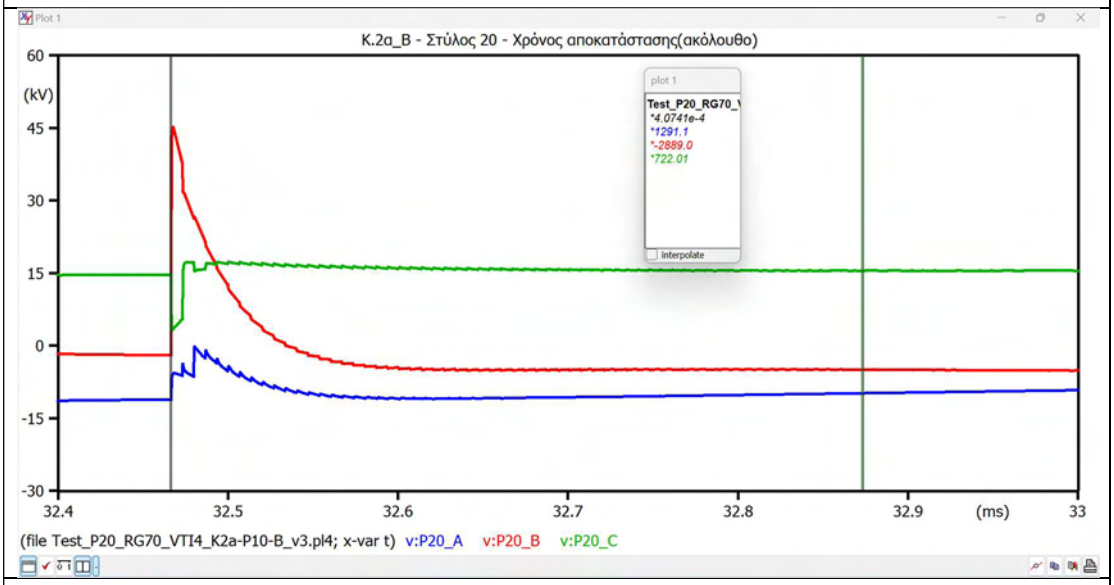
(δ)

Σχήμα 6-12 Στύλος P20: (α) Πρώτο πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες και (δ) Κατώτατες τιμές ανά φάση (K.2.a_B)

Σενάριο 2 (Κ.2.α_Β) - Στύλος Ρ20: Ακόλουθο Πλήγμα

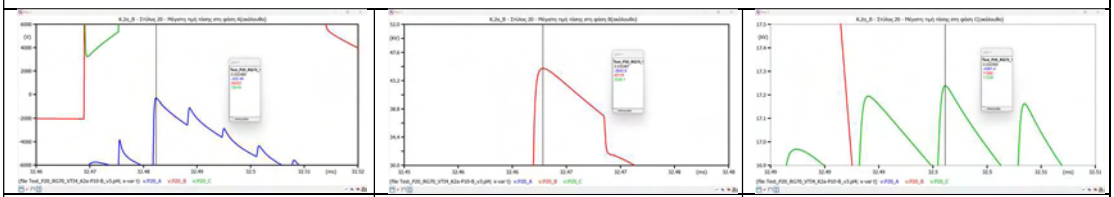


(α)



Χρόνος αποκατάστασης 0,00040741 s μετά το πλήγμα

(β)



Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
-0,322 kV	32,480 ms	45,116 kV	32,467 ms	17,238 kV	35,000 ms

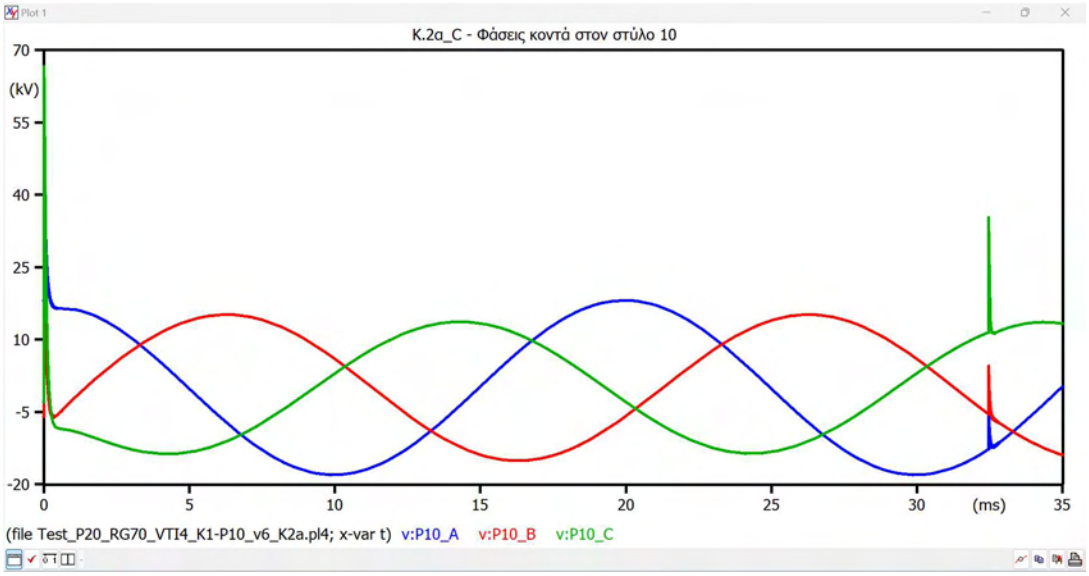
(γ)

Σχήμα 6-13 Στύλος Ρ20: (α) Ακόλουθο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες τιμές ανά φάση (Κ.2.α_Β)

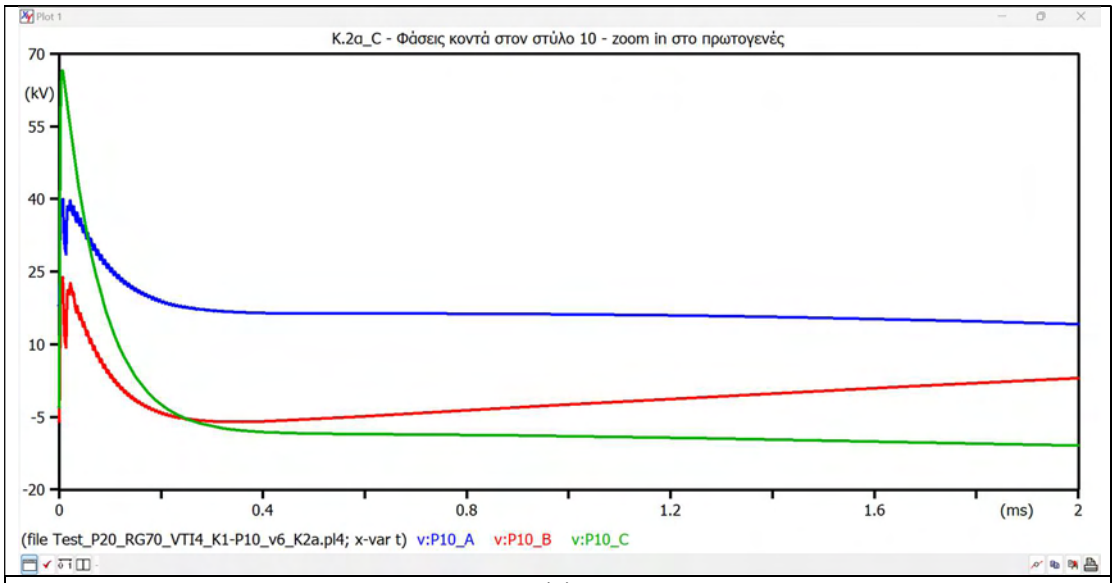
6.3.3 Σενάριο 3 (Κ.2.a_C)

Κ.2.a_C: Κεραυνικό Πρώτο πλήγμα ρεύματος κορυφής 35 kA και διαρκειών μετώπου/ουράς= 6/78 μs ακολουθούμενο από Ακόλουθο κεραυνικό πλήγμα ρεύματος κορυφής 12 kA και διαρκειών μετώπου/ουράς= 1/30 μs (Κ.2α), στη φάση C του 10^{ου} στύλου του δικτύου.

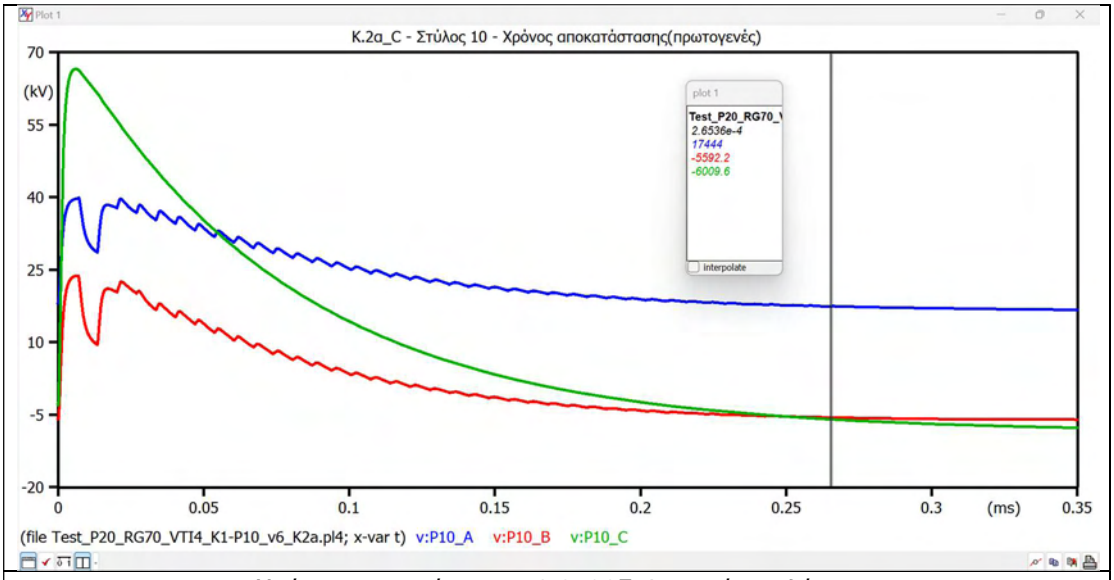
Σενάριο 3 (Κ.2.a_C) - Στύλος P10



Σενάριο 3 (Κ.2.a_C) - Στύλος P10: Πρώτο Πλήγμα

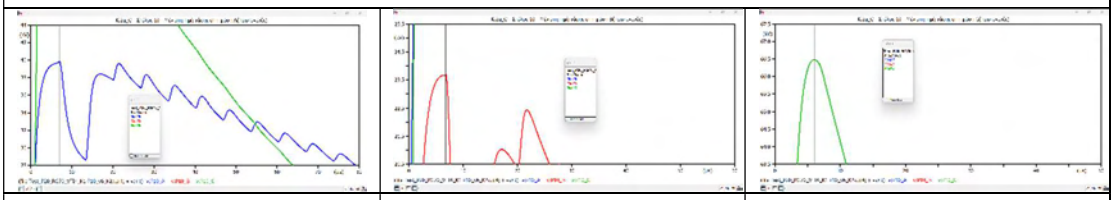


(α)



Χρόνος αποκατάστασης 2,6536E-4 s μετά το πλήγμα

(β)

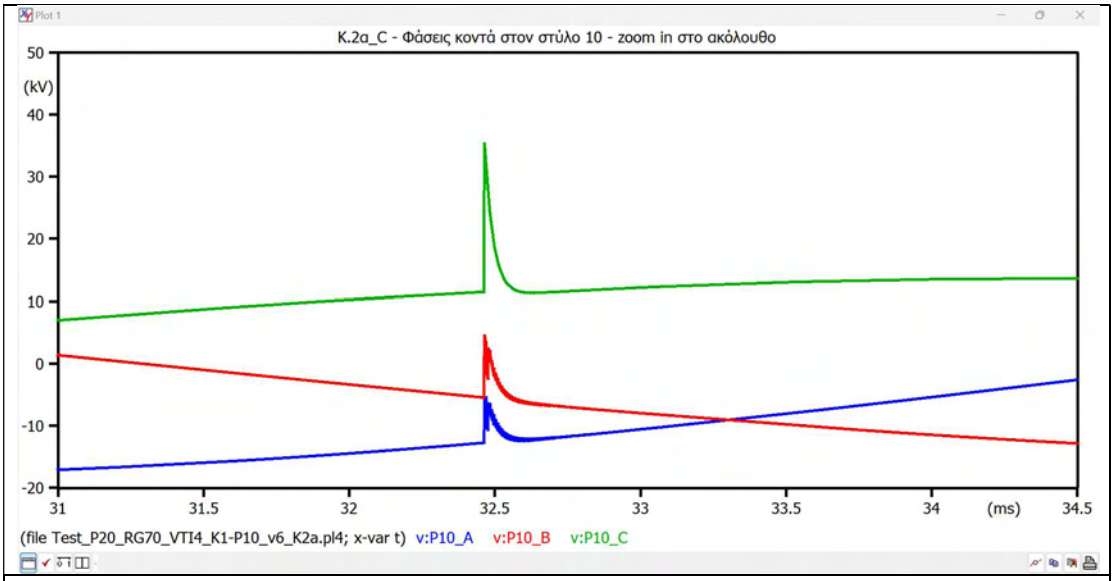


Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
39,829 kV	6,950 μs	23,685 kV	6,790 μs	66,474 kV	6,040 μs

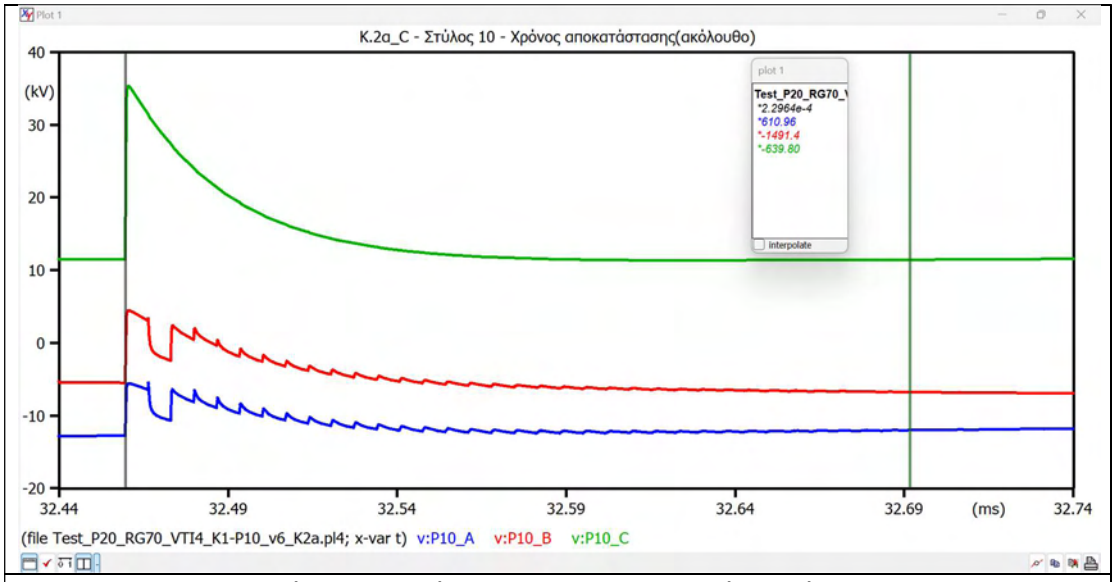
(γ)

Σχήμα 6-14 Στύλος P10: (α) Πρώτο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες τιμές ανά φάση (K.2.α_C)

Σενάριο 3 (K.2.α_C) - Στύλος P10: Ακόλουθο Πλήγμα

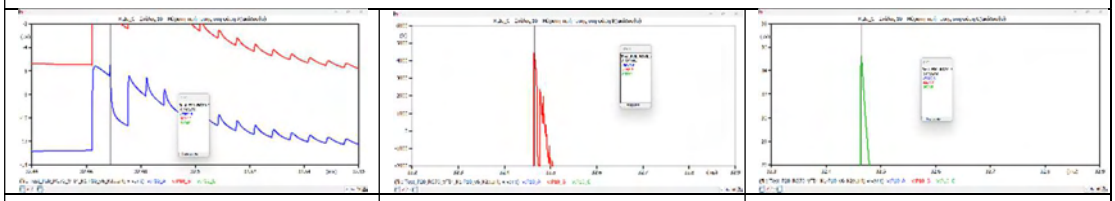


(α)



Χρόνος αποκατάστασης 2,2964E-4 s μετά το πλήγμα

(β)



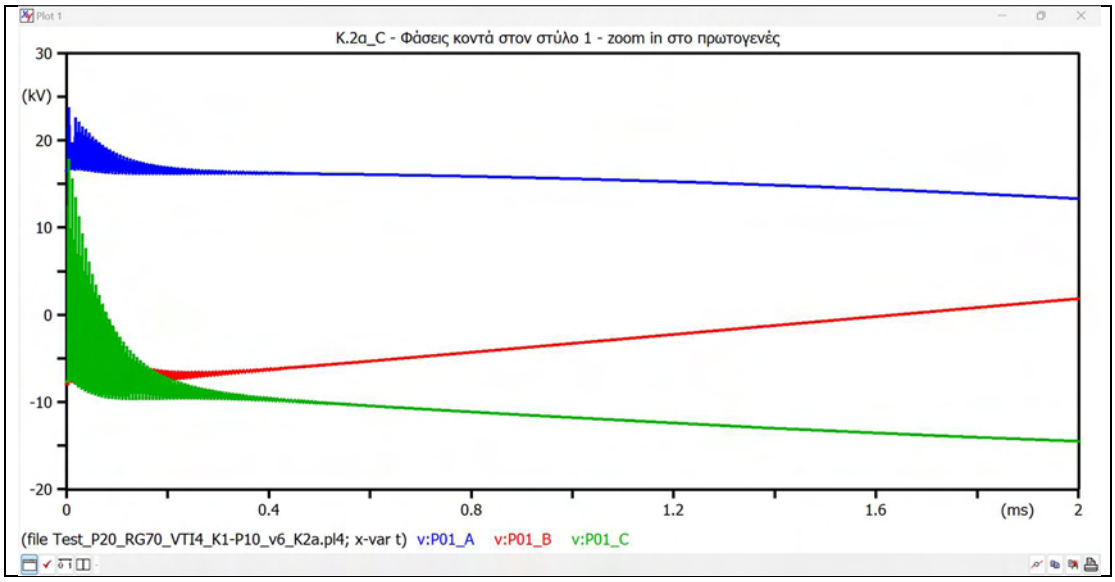
Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
-5,570 kV	32,470 ms	0,448 kV	32,464 ms	35,265 kV	32,464 ms

(γ)

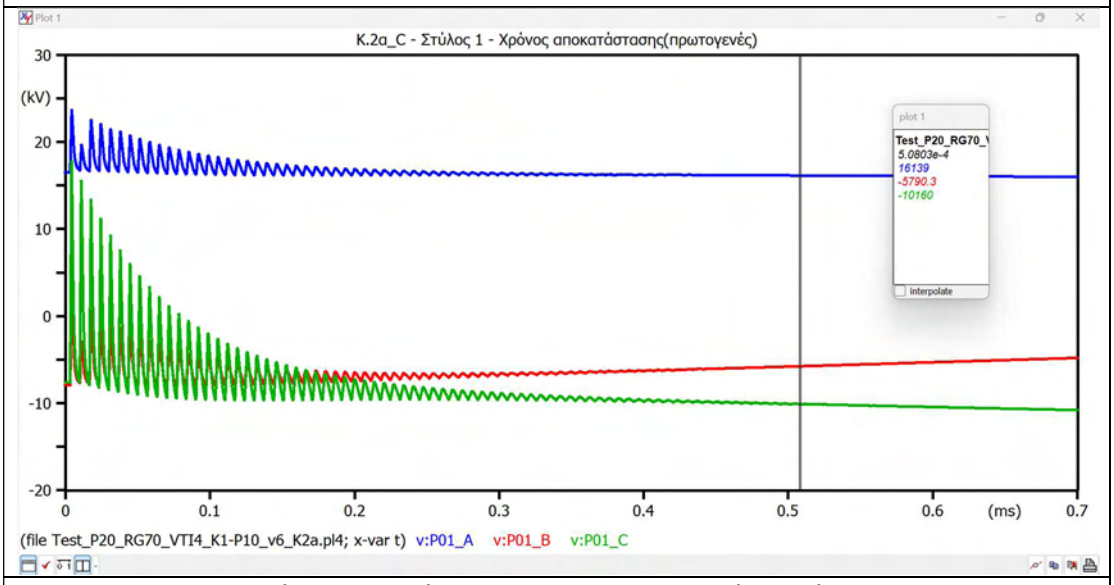
Σχήμα 6-15 Στύλος P10: (α) Ακόλουθο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες τιμές ανά φάση (K.2.α_C)

Σενάριο 3 (K.2.α_C) - Στύλος P01

Σενάριο 3 (K.2.α_C) - Στύλος P01: Πρώτο Πλήγμα

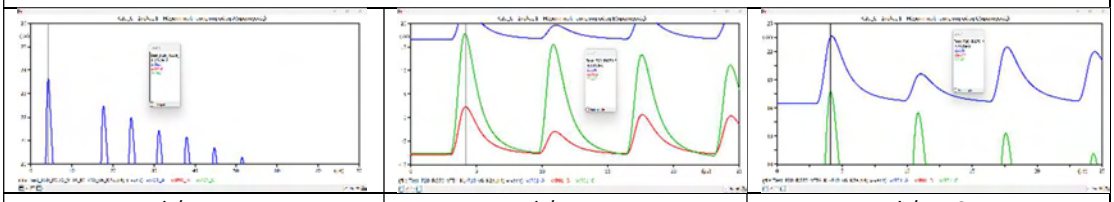


(α)



Χρόνος αποκατάστασης 0,00050803 s μετά το πλήγμα

(β)

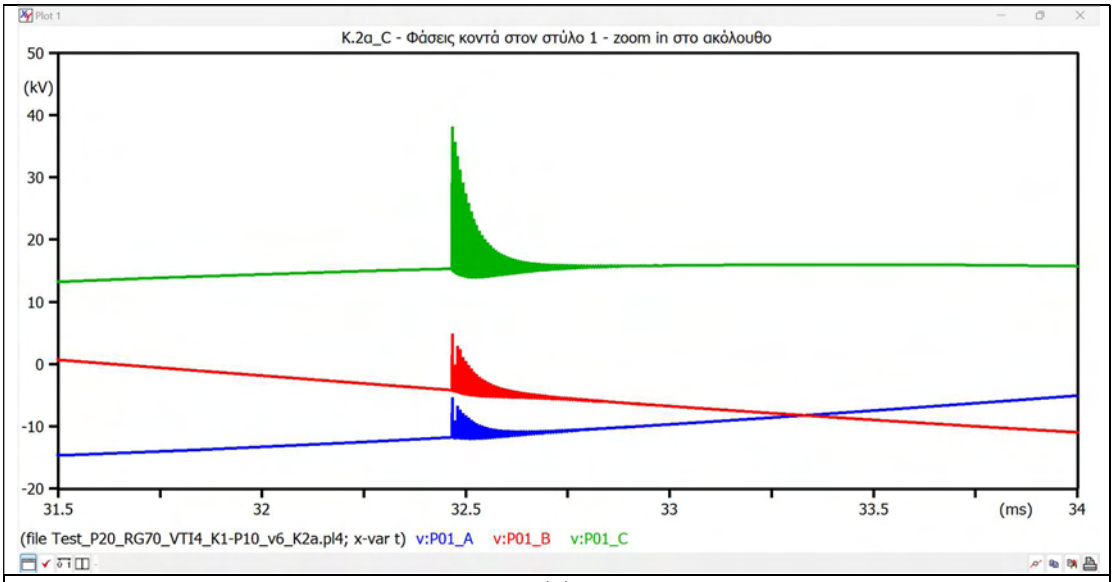


Φάση A		Φάση B		Φάση C	
23,633 kV	4,210 μs	2,252 kV	4,160 μs	17,751 kV	4,110 μs

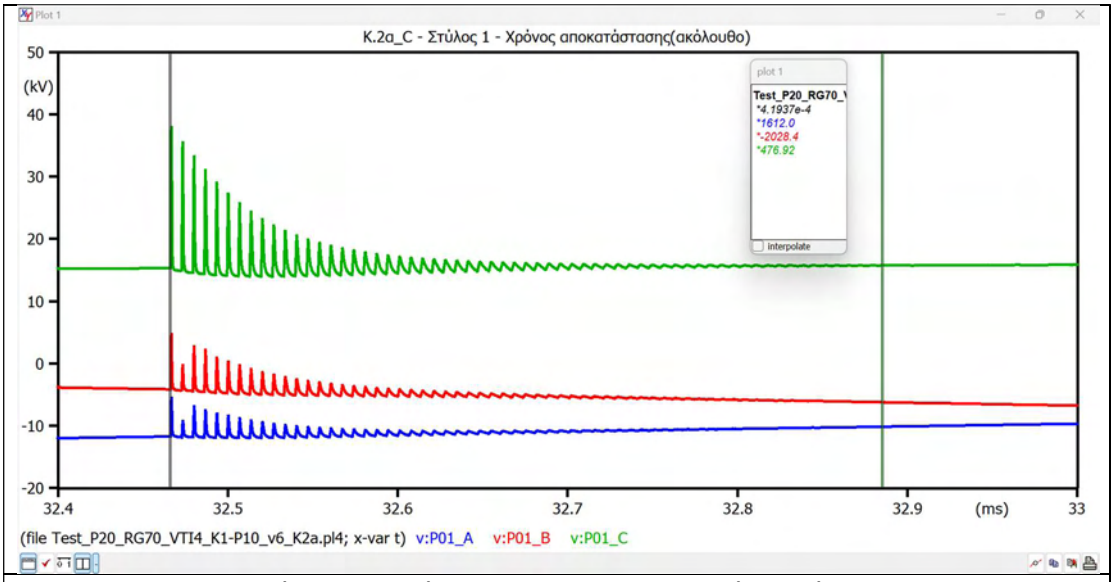
(γ)

Σχήμα 6-16 Στύλος P01: (α) Πρώτο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες τιμές ανά φάση (Κ.2.α_C)

Σενάριο 3 (Κ.2.α_C) - Στύλος P01: Ακόλουθο Πλήγμα

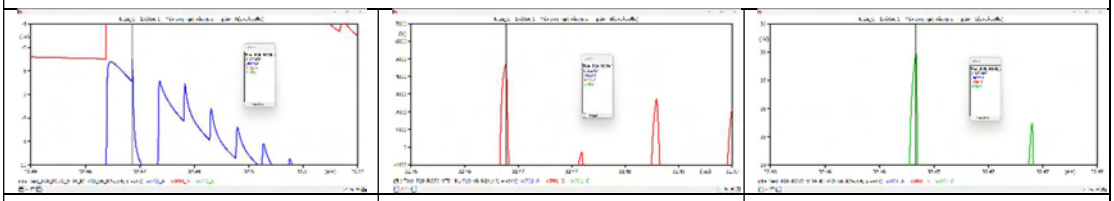


(α)



Χρόνος αποκατάστασης 0,00041937 s μετά το πλήγμα

(β)



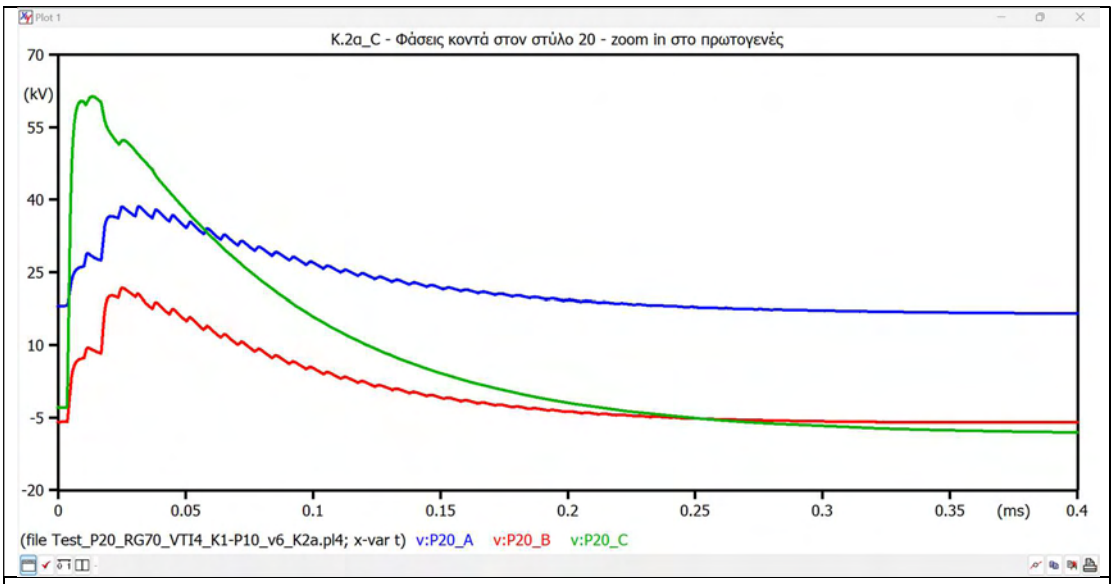
Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
-5,509 kV	32,470 ms	4,717 kV	32,467 ms	37,930 kV	32,467 ms

(γ)

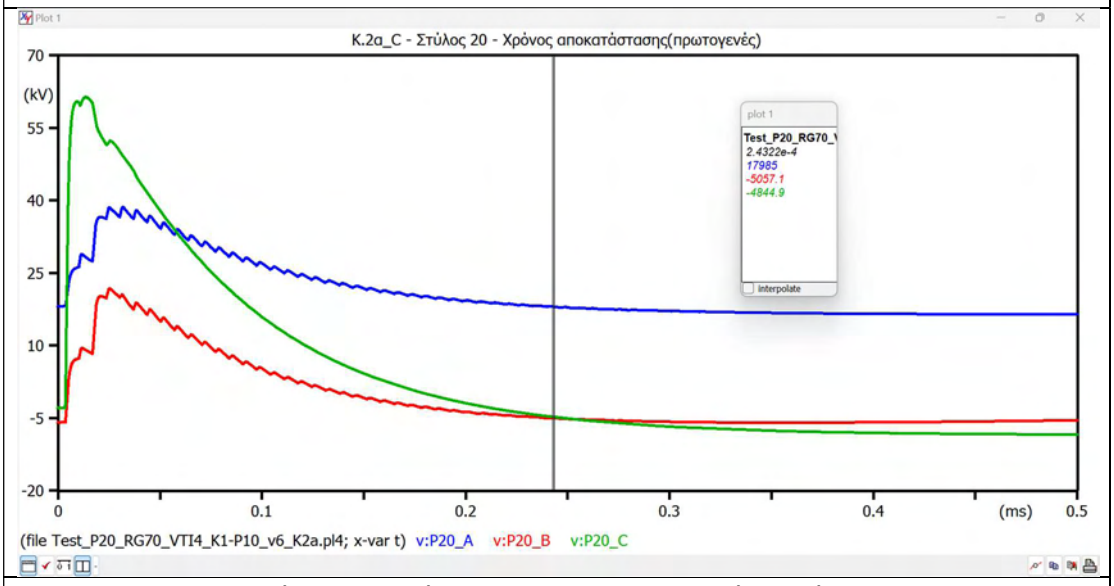
Σχήμα 6-17 Στύλος P01: (α) Ακόλουθο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες τιμές ανά φάση (K.2.a_C)

Σενάριο 3 (K.2.a_C) - Στύλος P20

Σενάριο 3 (K.2.a_C) - Στύλος P20: Πρώτο Πλήγμα

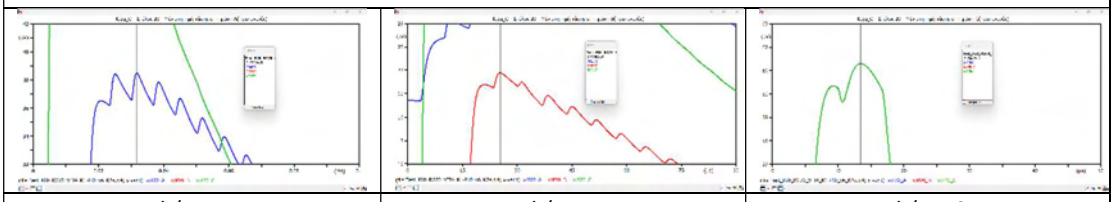


(α)



Χρόνος αποκατάστασης 0,00024322 s μετά το πλήγμα

(β)

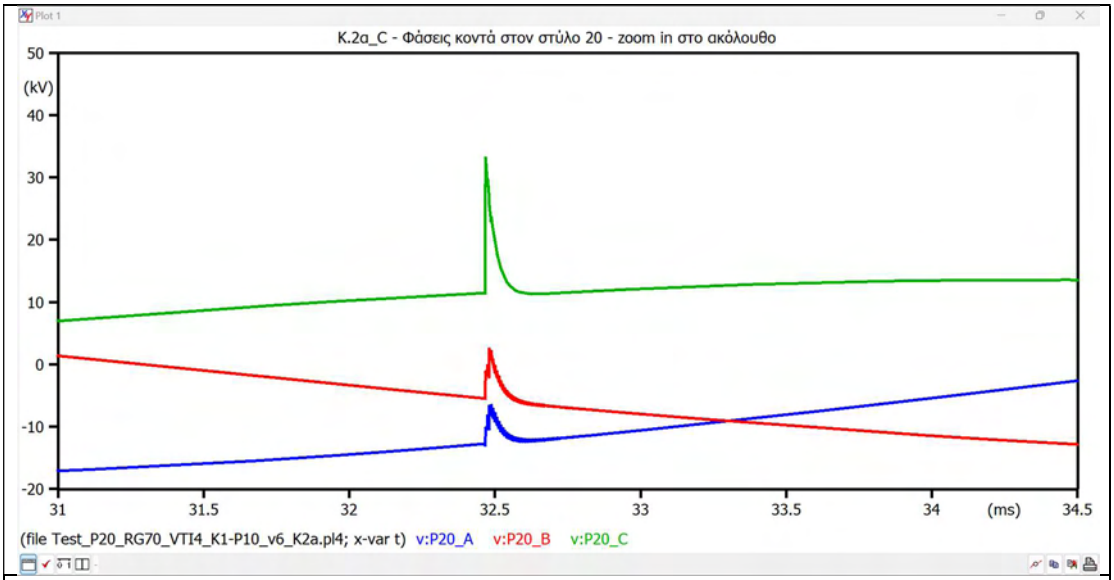


Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
38,496 kV	31,720 μs	21,667 kV	25,250 μs	61,296 kV	13,390 μs

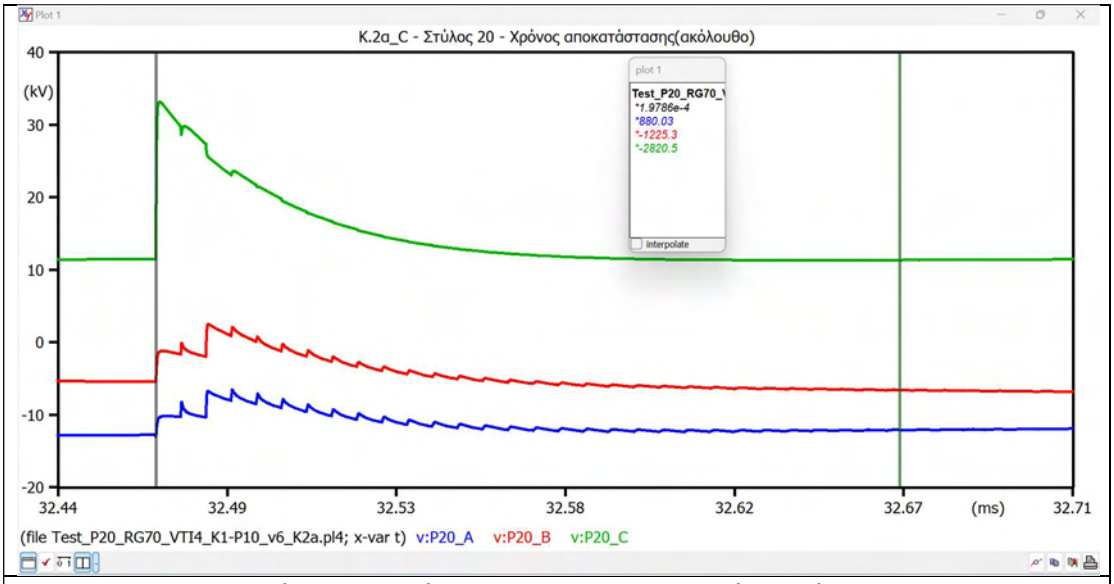
(γ)

Σχήμα 6-18 Στύλος P20: (α) Πρώτο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες τιμές ανά φάση (K.2.α_C)

Σενάριο 3 (K.2.α_C) - Στύλος P20: Ακόλουθο Πλήγμα

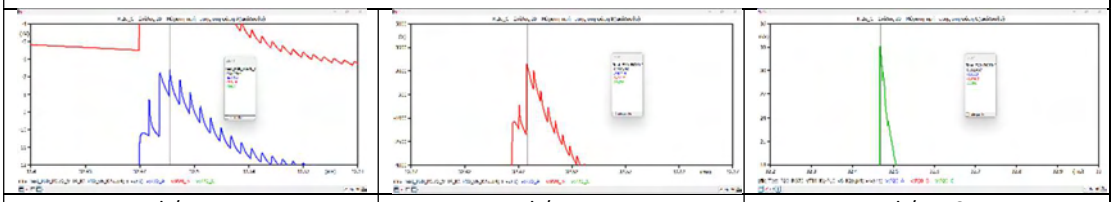


(α)



Χρόνος αποκατάστασης 0,00019786 s μετά το πλήγμα

(β)



Φάση A		Φάση B		Φάση C	
-6,613 kV	32,487 ms	2,432 kV	32,480 ms	33,098 kV	32,467 ms

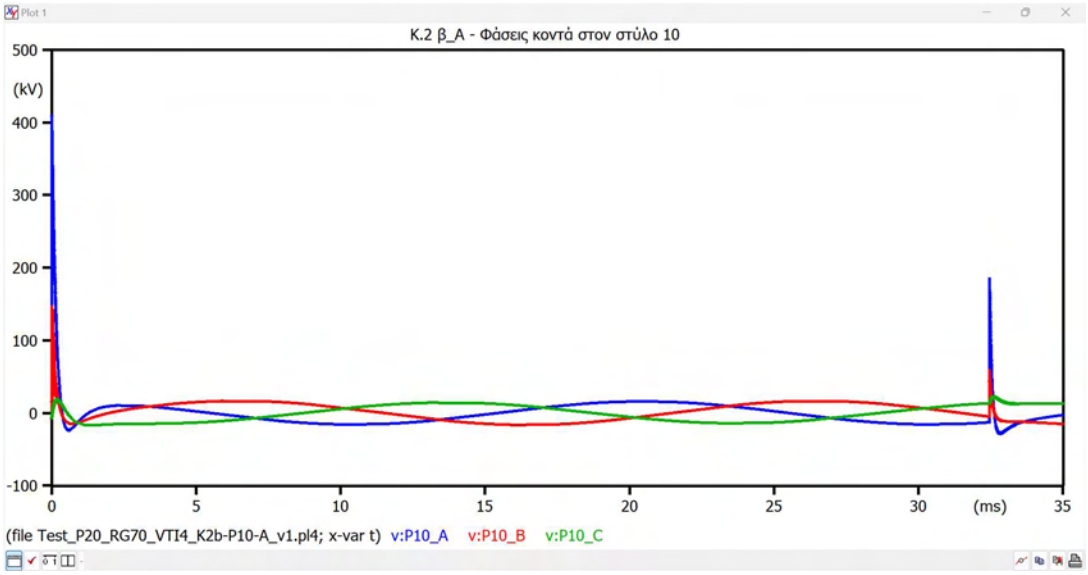
(γ)

Σχήμα 6-19 Στύλος P20: (α) Ακόλουθο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες τιμές ανά φάση (K.2.a_C)

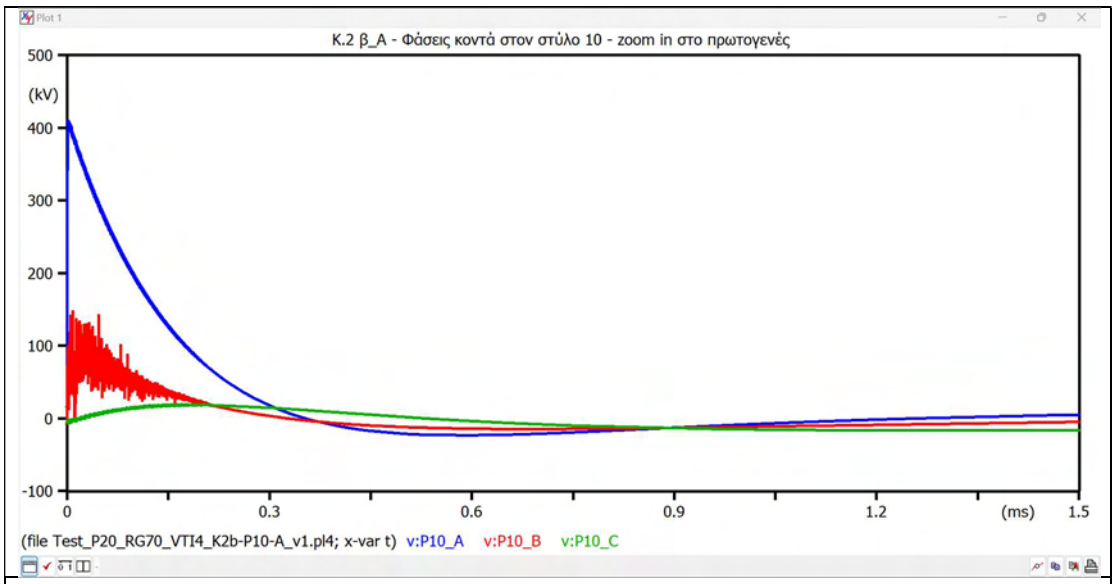
6.3.4 Σενάριο 4 (K.2.b_A)

K.2.b_A: Κεραυνικό Πρώτο πλήγμα ρεύματος κορυφής 100 kA και διαρκειών μετώπου/ουράς= 1/200 μs ακολουθούμενο από Ακόλουθο κεραυνικό πλήγμα ρεύματος κορυφής 50 kA και διαρκειών μετώπου/ουράς= 0.25/100 μs (K.2β), στη φάση A του 10^{ου} στύλου του δικτύου.

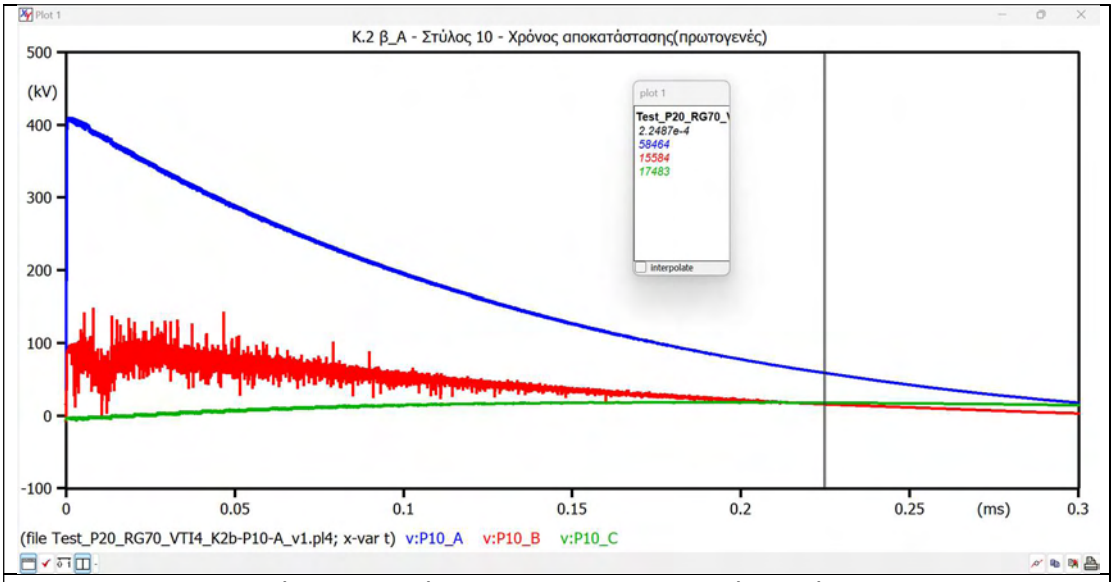
Σενάριο 4 (K.2.b_A) - Στύλος P10



Σενάριο 4 (K.2.b_A) - Στύλος P10: Πρώτο Πλήγμα

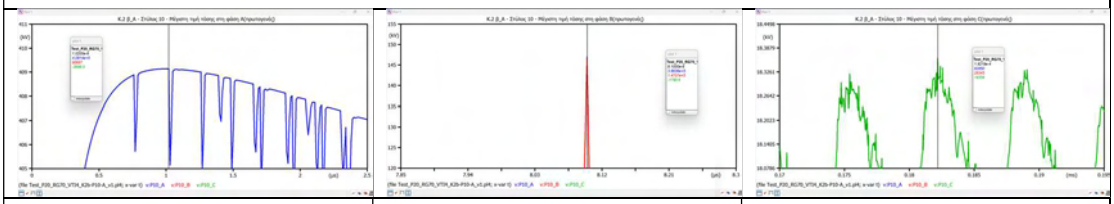


(α)



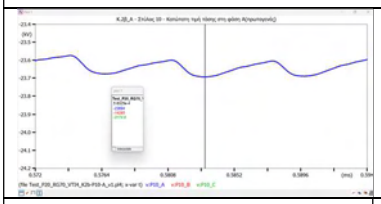
Χρόνος αποκατάστασης 0,00022487 s μετά το πλήγμα

(β)



Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
409,100 kV	1,020 μs	147,070 kV	8,100 μs	18,358 kV	182,190 μs

(γ)

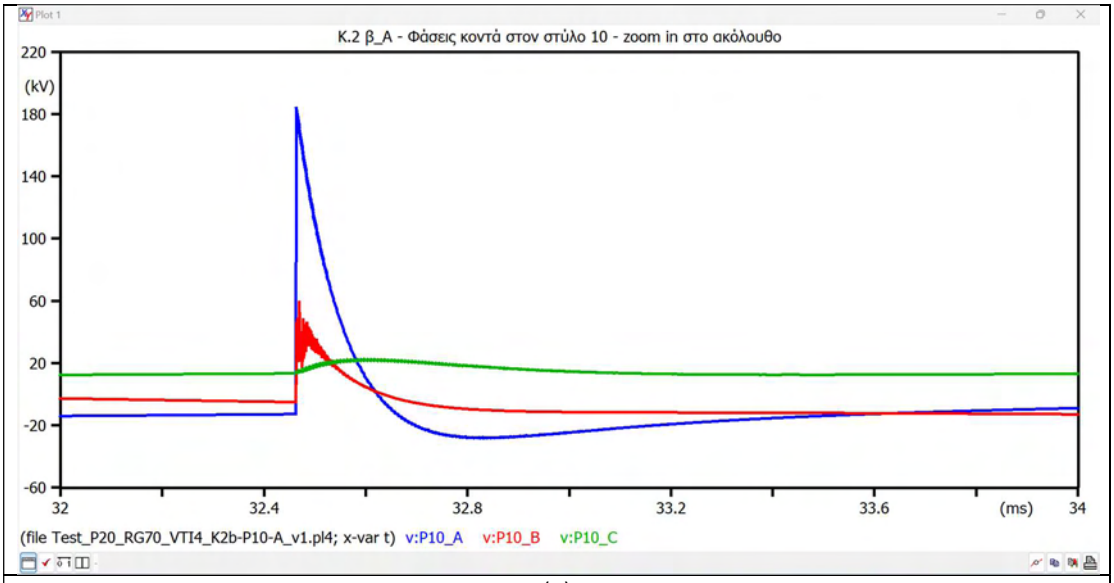


Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
-23,694 kV	583,280 μs				

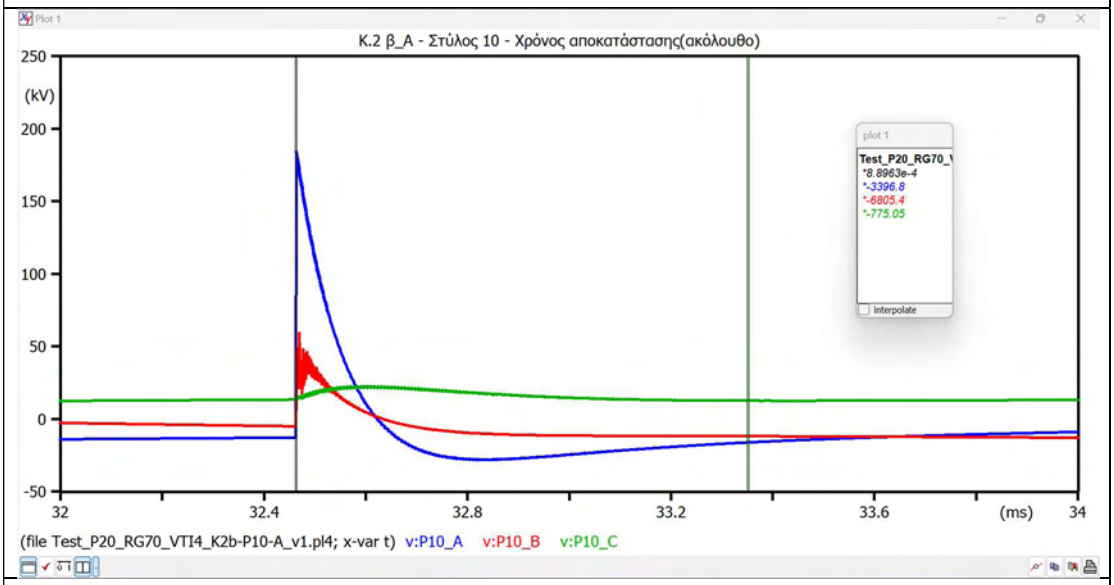
(δ)

Σχήμα 6-20 Στύλος P10: (α) Πρώτο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες και (δ) Κατώτατες τιμές ανά φάση (K.2.b_A)

Σενάριο 4 (Κ.2.b_Α) - Στύλος P10: Ακόλουθο Πλήγμα

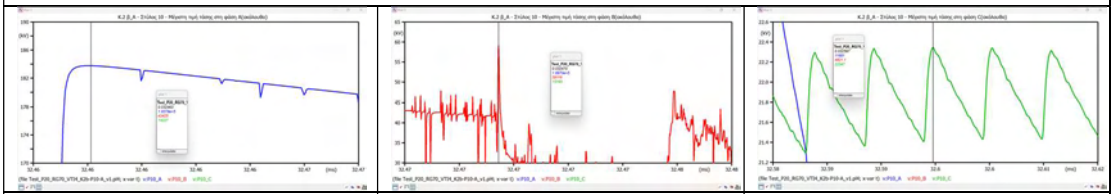


(α)



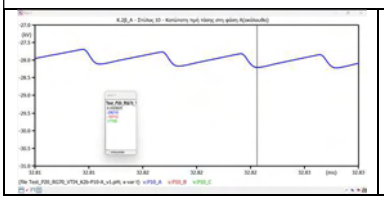
Χρόνος αποκατάστασης 0,00088963 s μετά το πλήγμα

(β)



Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
183,780 kV	32,463 ms	59,116 kV	32,470 ms	22,347 kV	32,597 ms

(γ)

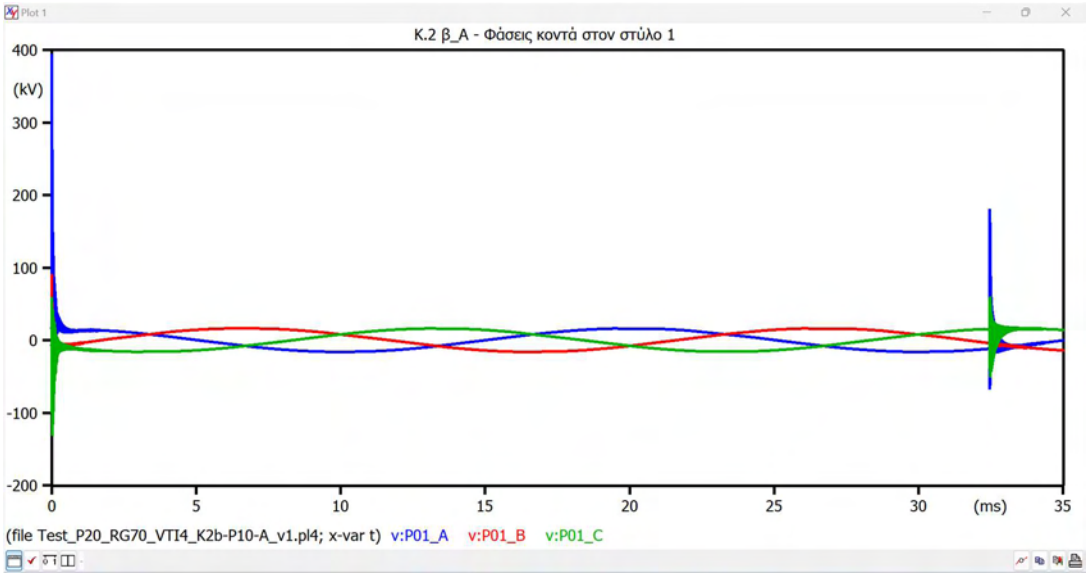


Φάση A		Φάση B		Φάση C	
-28,210 kV	32,825 ms				

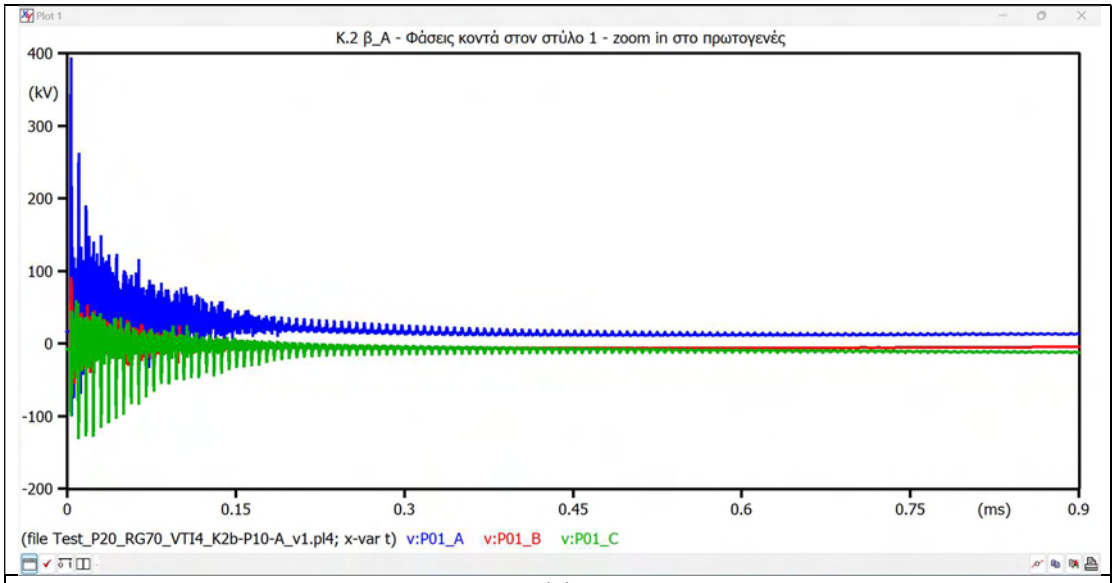
(δ)

Σχήμα 6-21 Στύλος P10: (α) Ακόλουθο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες και (δ) Κατώτατες τιμές ανά φάση (K.2.b_A)

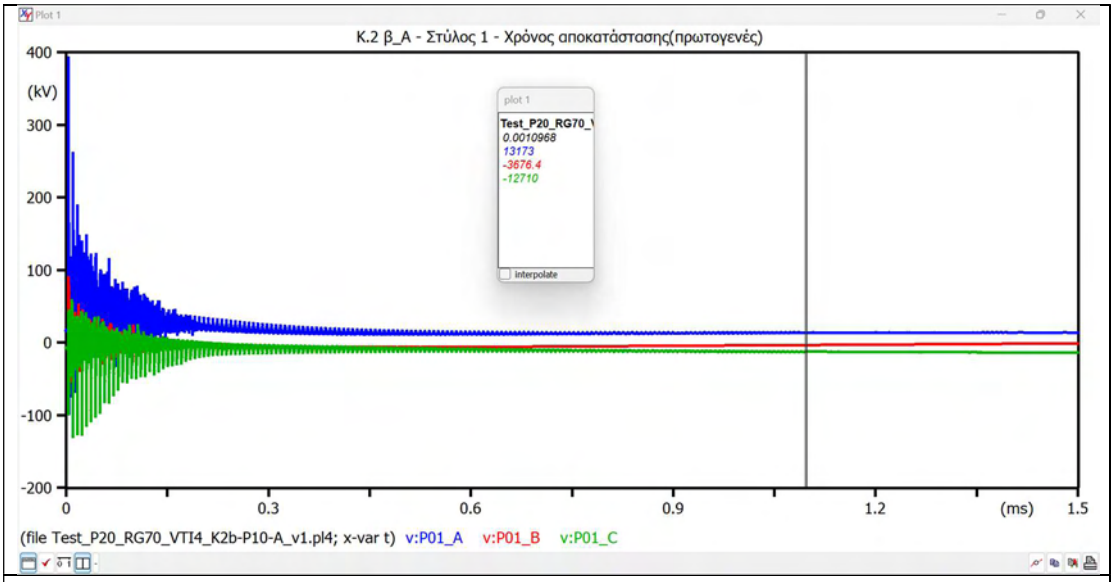
Σενάριο 4 (K.2.b_A) - Στύλος P01



Σενάριο 4 (K.2.b_A) - Στύλος P01: Πρώτο Πλήγμα

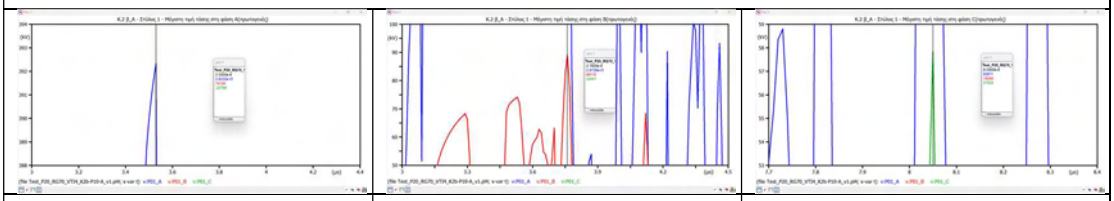


(α)



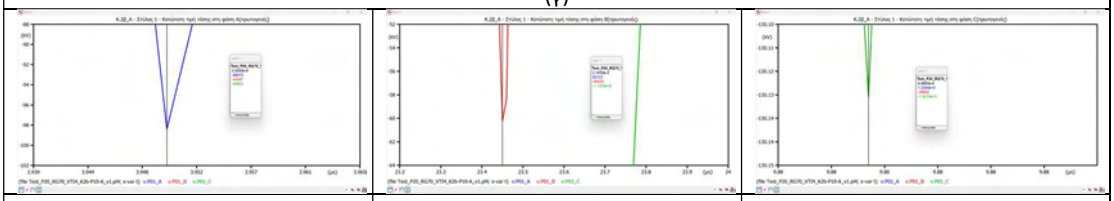
Χρόνος αποκατάστασης 0,0010968 s μετά το πλήγμα

(β)



Φάση A		Φάση B		Φάση C	
392,320 kV	3,530 μs	89,118 kV	3,760 μs	57,829 kV	8,050 μs

(γ)

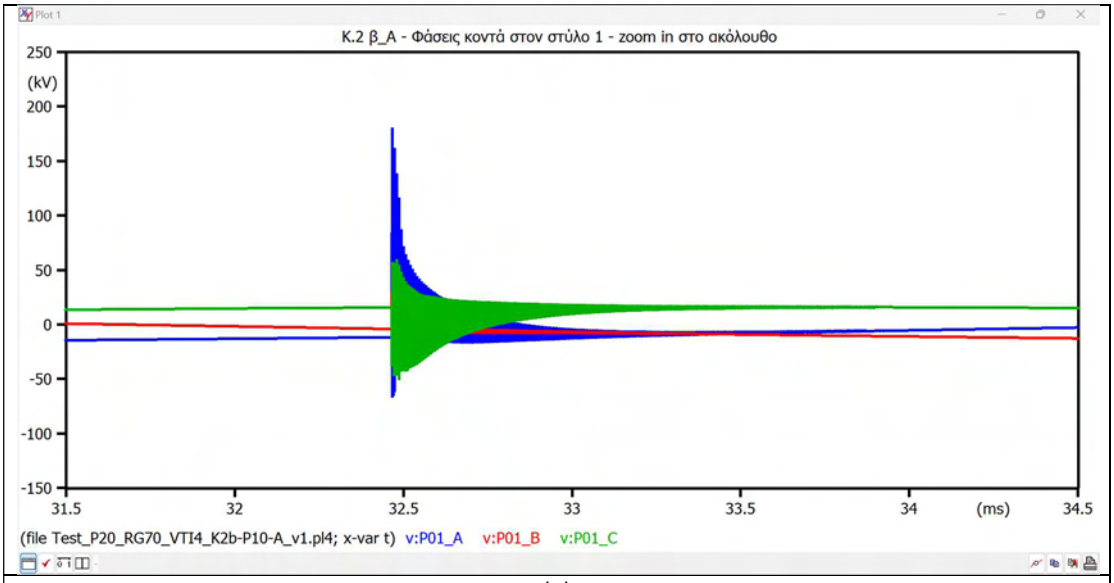


Φάση A		Φάση B		Φάση C	
-98,415 kV	3,950 μs	-60,222 kV	23,450 μs	-130,130 kV	9,880 μs

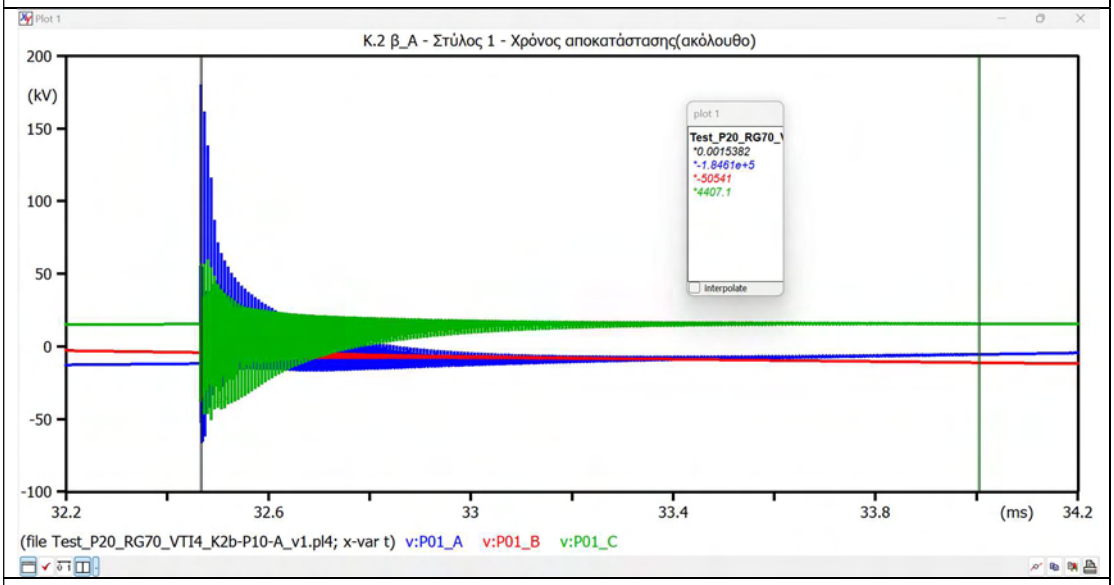
(δ)

Σχήμα 6-22 Στύλος P01: (α) Πρώτο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες και (δ) Κατώτατες τιμές ανά φάση (K.2.b_A)

Σενάριο 4 (K.2.b_A) - Στύλος P01: Ακόλουθο Πλήγμα

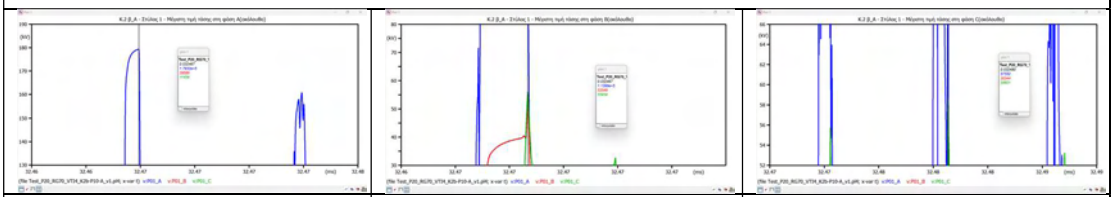


(α)



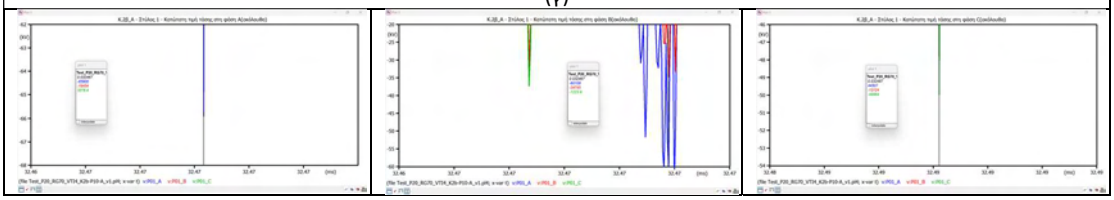
Χρόνος αποκατάστασης 0,0015382 s μετά το πλήγμα

(β)



Φάση A		Φάση B		Φάση C	
179,320 kV	32,467 ms	53,549 kV	32,467 ms	58,601 kV	32,480 ms

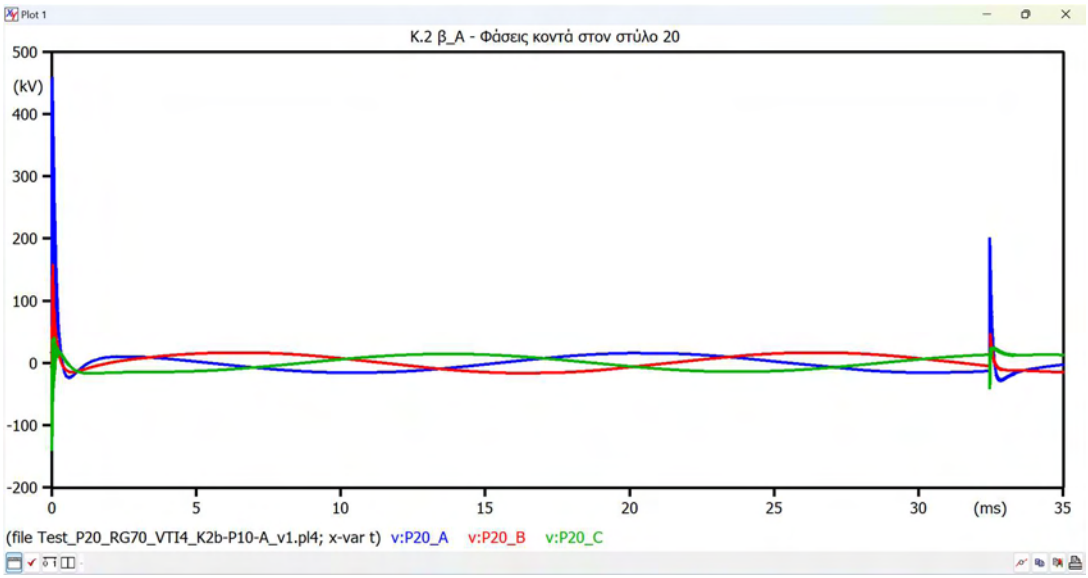
(γ)



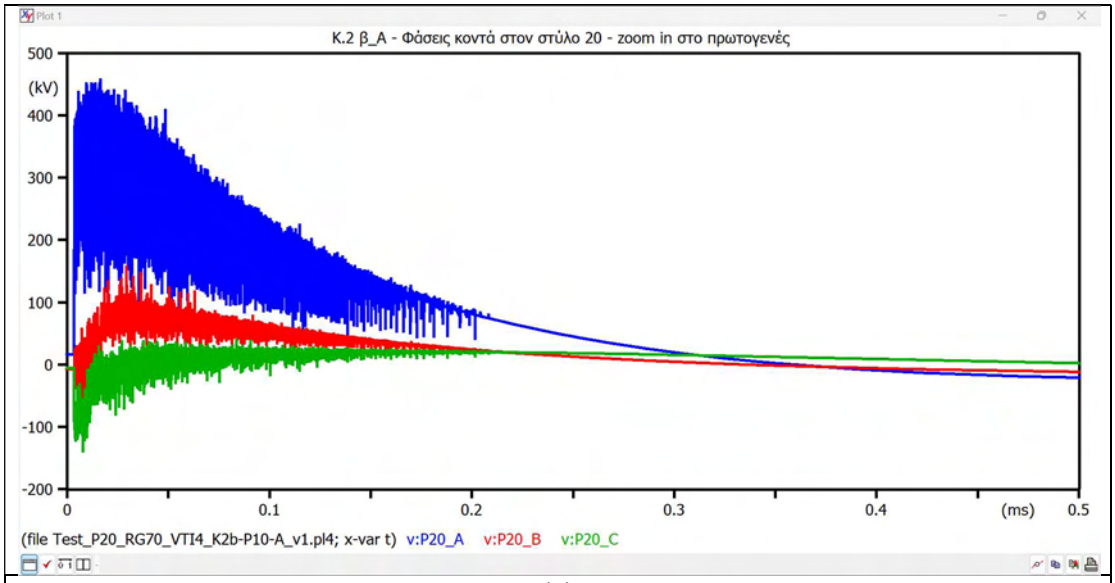
Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
-65,900 kV	32,467 ms	-34,745 kV	32,467 ms	-49,964 kV	32,487 ms
(δ)					

Σχήμα 6-23 Στύλος P01: (α) Ακόλουθο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες και (δ) Κατώτατες τιμές ανά φάση (K.2.b_A)

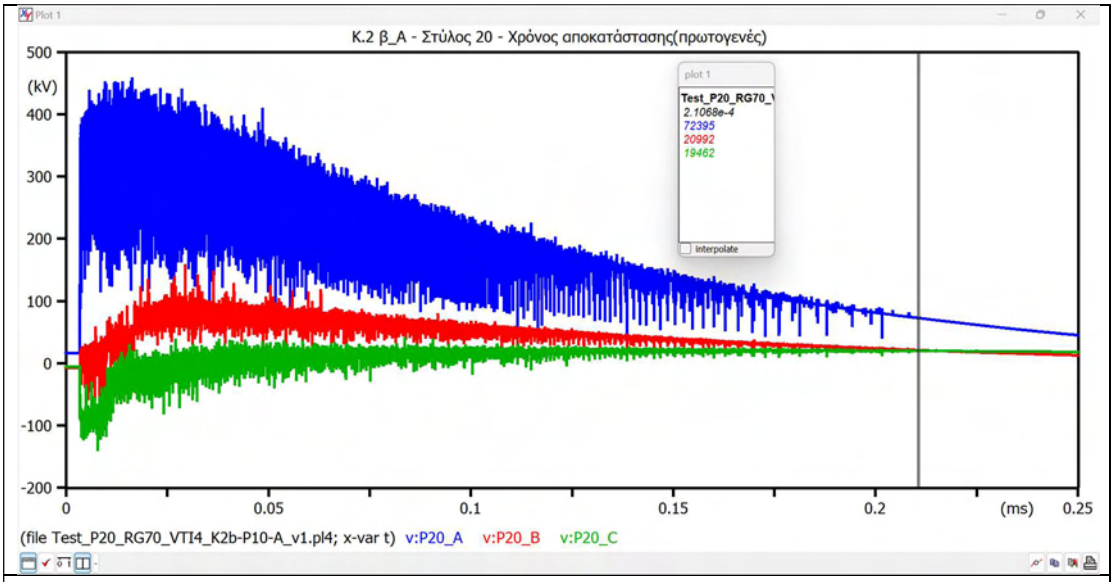
Σενάριο 4 (K.2.b_A) - Στύλος P20



Σενάριο 4 (K.2.b_A) - Στύλος P20: Πρώτο Πλήγμα

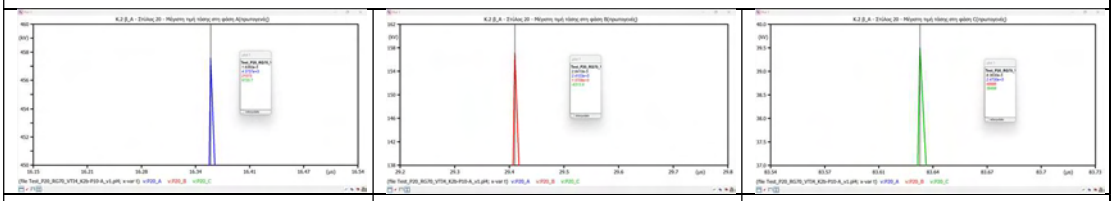


(α)



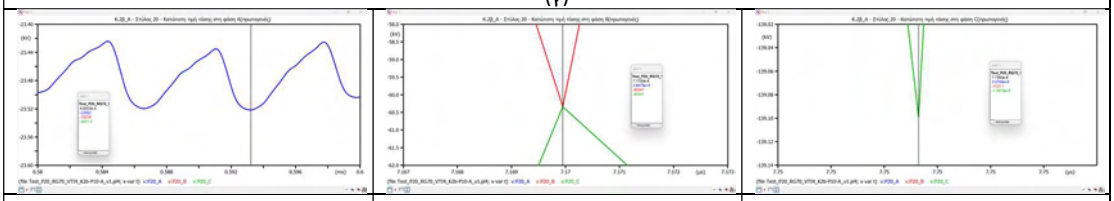
Χρόνος αποκατάστασης 0,00021068 s μετά το πλήγμα

(β)



Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
457,570 kV	16,360 μs	157,090 kV	29,410 μs	39,498 kV	83,630 μs

(γ)

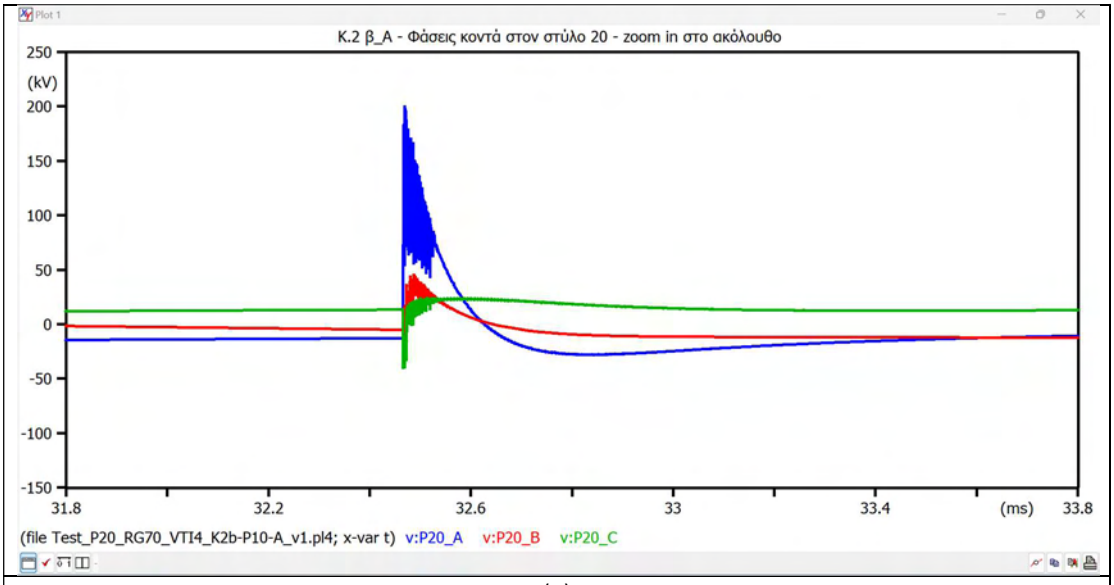


Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
-23,522 kV	593,230 μs	-60,341 kV	7,170 μs	-139,190 kV	7,750 μs

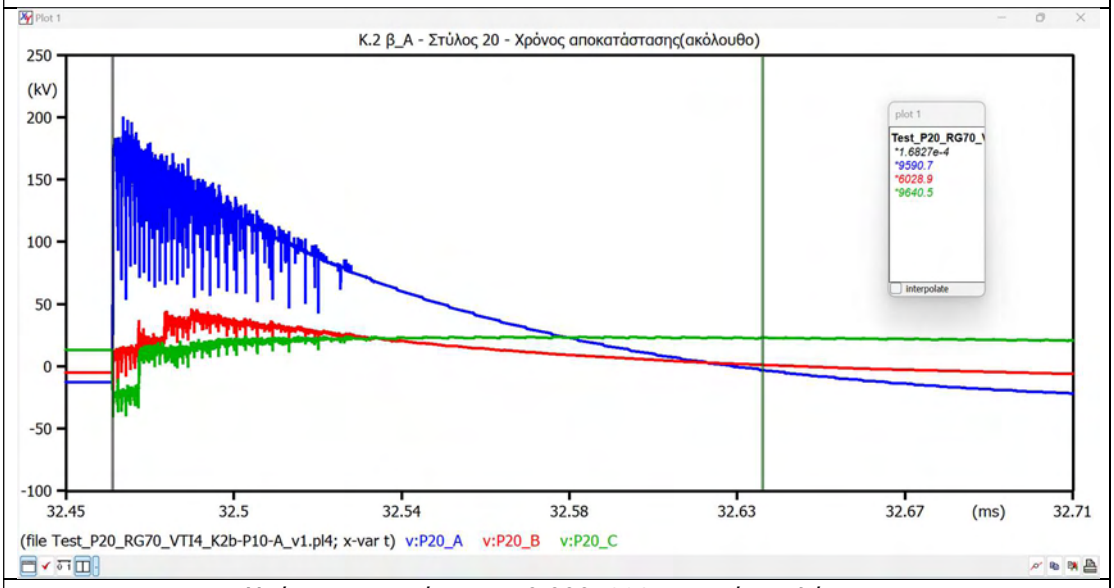
(δ)

Σχήμα 6-24 Στύλος P20: (α) Πρώτο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες και (δ) Κατώτατες τιμές ανά φάση (K.2.b_A)

Σενάριο 4 (Κ.2.b_Α) - Στύλος P20: Ακόλουθο Πλήγμα

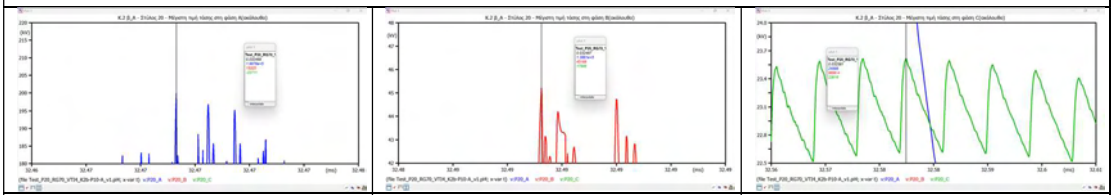


(α)



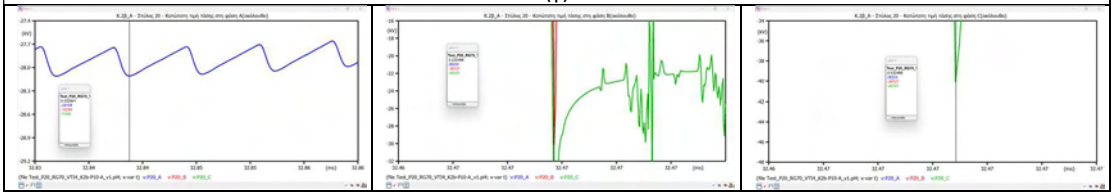
Χρόνος αποκατάστασης 0,00016827 s μετά το πλήγμα

(β)



Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
199,760 kV	32,469 ms	45,199 kV	32,487 ms	23,616 kV	32,581 ms

(γ)



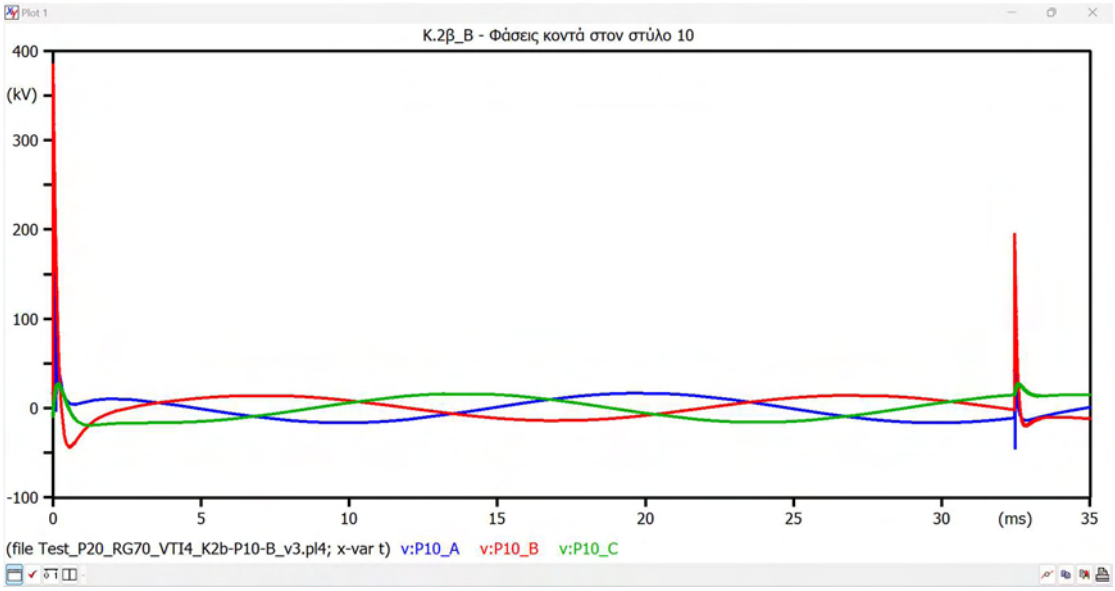
Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
-28,108 kV	32,841 ms	-30,127 kV	32,466 ms	-40,101 kV	32,466 ms
(δ)					

Σχήμα 6-25 Στύλος P20: (α) Ακόλουθο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες και (δ) Κατώτατες τιμές ανά φάση (K.2.b_A)

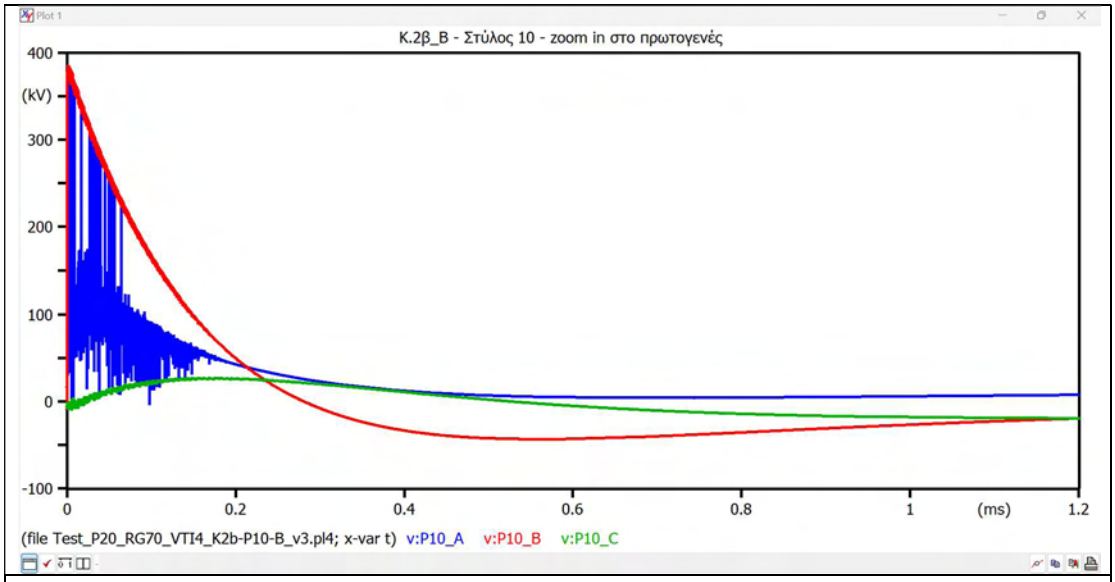
6.3.5 Σενάριο 5 (K.2.b_B)

K.2.b_B: Κεραυνικό Πρώτο πλήγμα ρεύματος κορυφής 100 kA και διαρκειών μετώπου/ουράς= 1/200 μs ακολουθούμενο από Ακόλουθο κεραυνικό πλήγμα ρεύματος κορυφής 50 kA και διαρκειών μετώπου/ουράς= 0.25/100 μs (K.2β), στη φάση Β του 10ου στύλου του δικτύου.

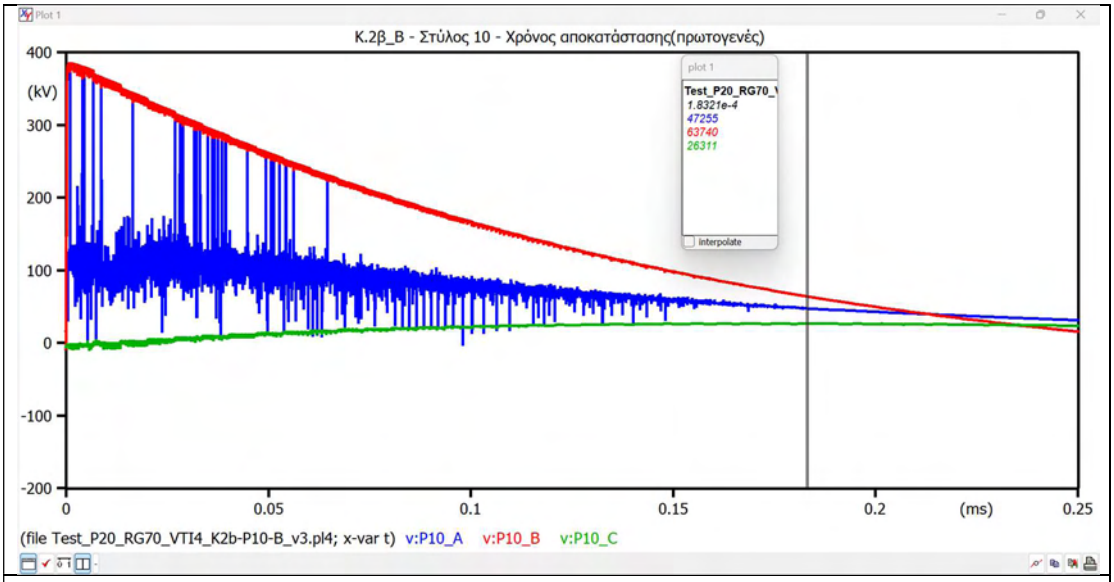
Σενάριο 5 (K.2.b_B) - Στύλος P10



Σενάριο 5 (K.2.b_B) - Στύλος P10: Πρώτο Πλήγμα

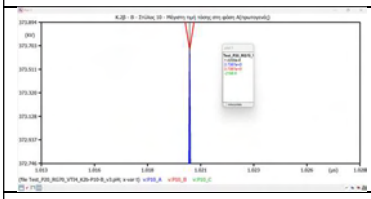


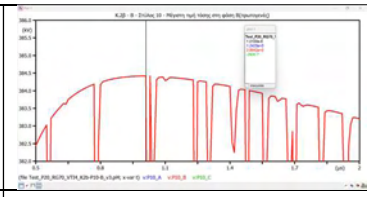
(α)

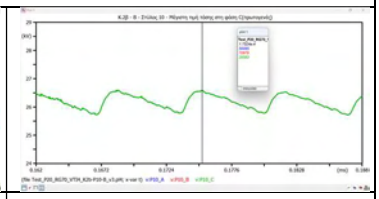


Χρόνος αποκατάστασης 0,00018321 s μετά το πλήγμα

(β)

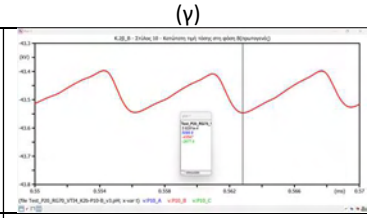


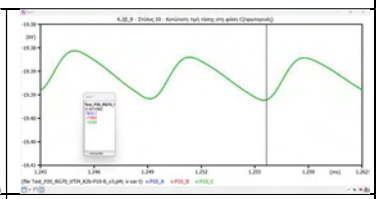




Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
373,670 kV	1,020 μs	384,420 kV	1,010 μs	26,583 kV	175,240 μs

(γ)



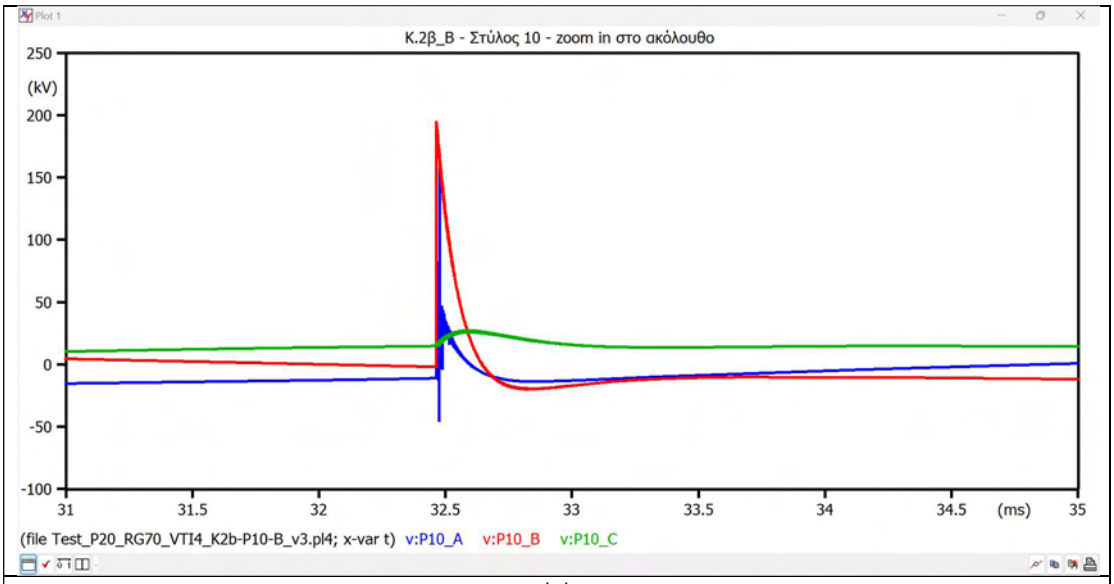


Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
		-43,547 kV	562,810 μs	-19,394 kV	1256,200 μs

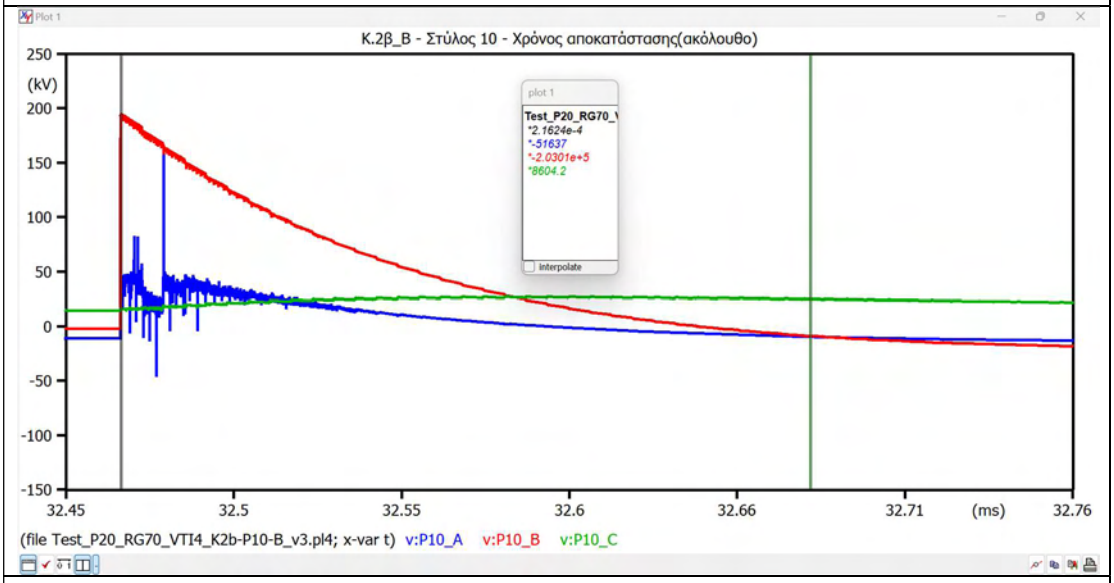
(δ)

Σχήμα 6-26 Στύλος P10: (α) Πρώτο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες και (δ) κατώτατες τιμές ανά φάση (K.2.b_B)

Σενάριο 5 (Κ.2.b_Β) - Στύλος Ρ10: Ακόλουθο Πλήγμα

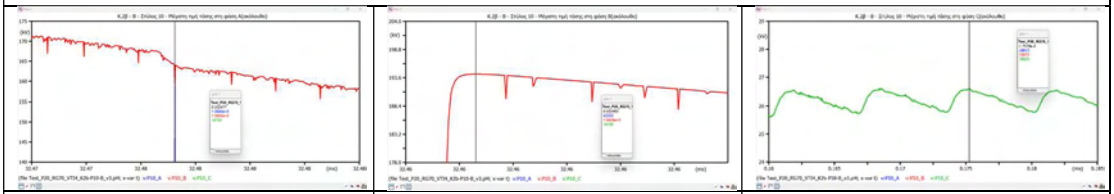


(α)



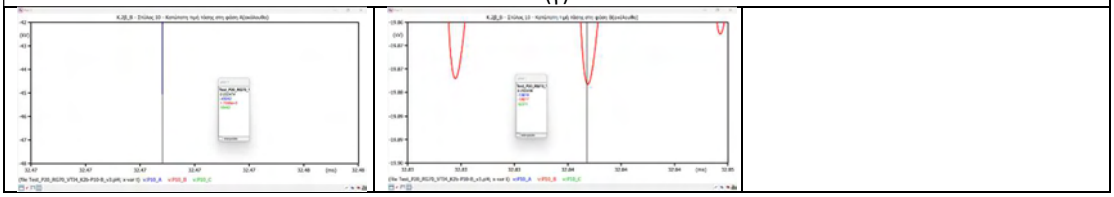
Χρόνος αποκατάστασης 0,00021624 s μετά το πλήγμα

(β)



Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
158,900 kV	32,477 ms	194,290 kV	32,463 ms	26,583 kV	0,175 ms

(γ)



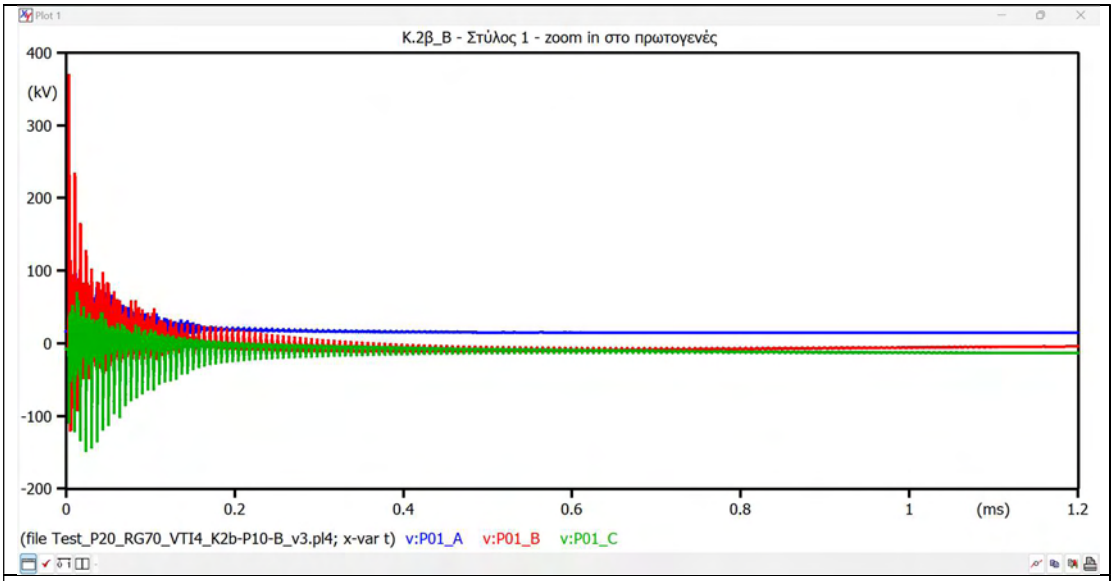
Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
-45,042 kV	32,474 ms	-1,987 kV	32,838 ms		

(δ)

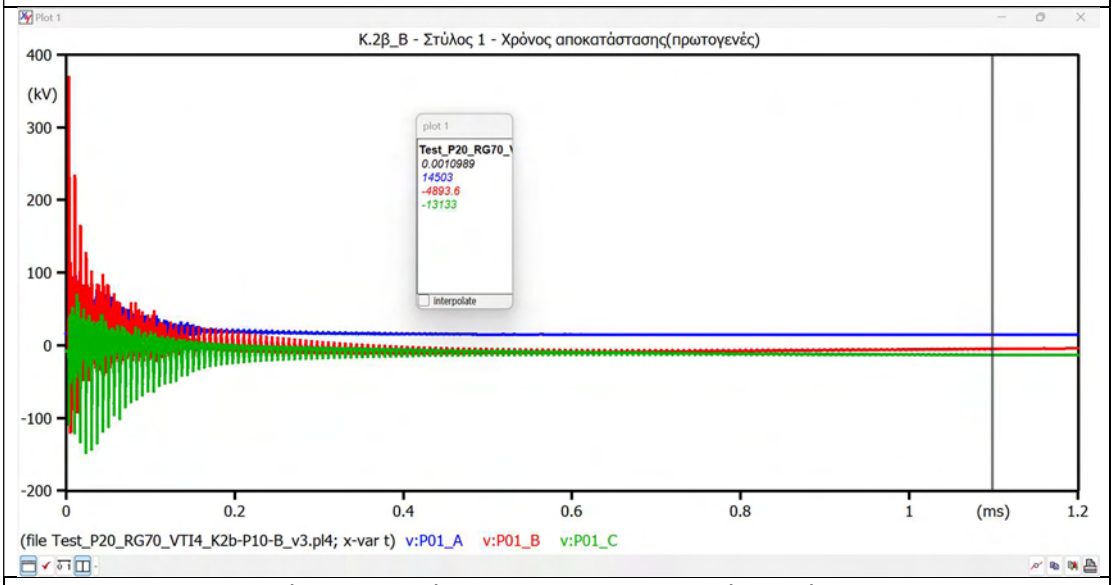
Σχήμα 6-27 Στύλος P10: (α) Ακόλουθο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες και (δ) Κατώτατες τιμές ανά φάση (Κ.2.b_Β)

Σενάριο 5 (Κ.2.b_Β) - Στύλος P01

Σενάριο 5 (Κ.2.b_Β) - Στύλος P01: Πρώτο Πλήγμα

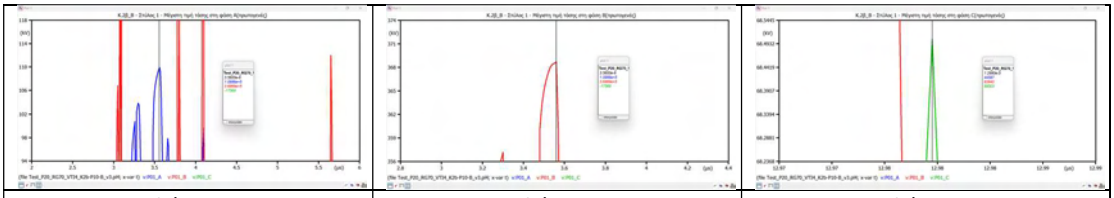


(α)



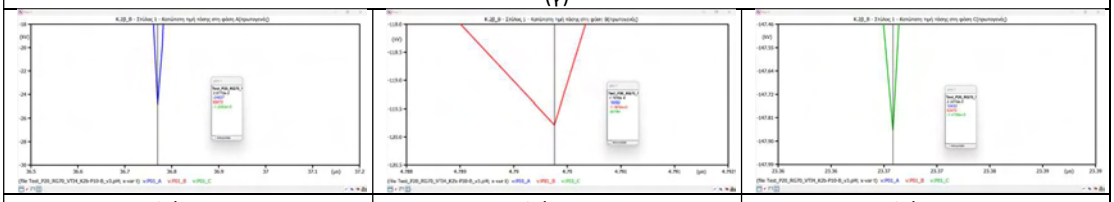
Χρόνος αποκατάστασης 0,0010989 s μετά το πλήγμα

(β)



Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
109,860 kV	3,560 μs	368,690 kV	3,560 μs	68,503 kV	12,980 μs

(γ)

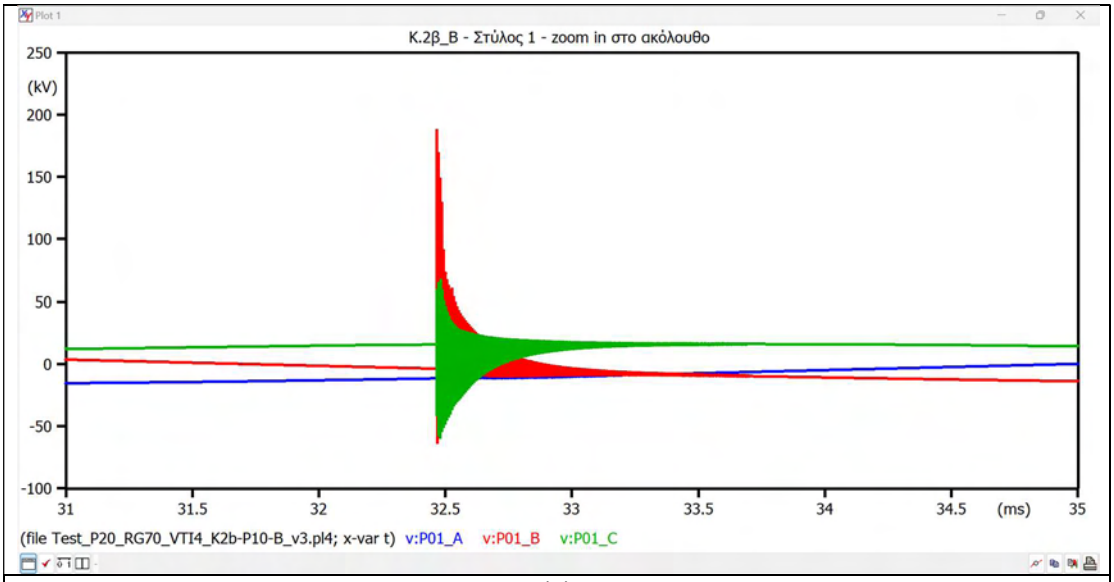


Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
-24,837 kV	36,770 μs	-119,790 kV	4,790 μs	-147,860 kV	23,370 μs

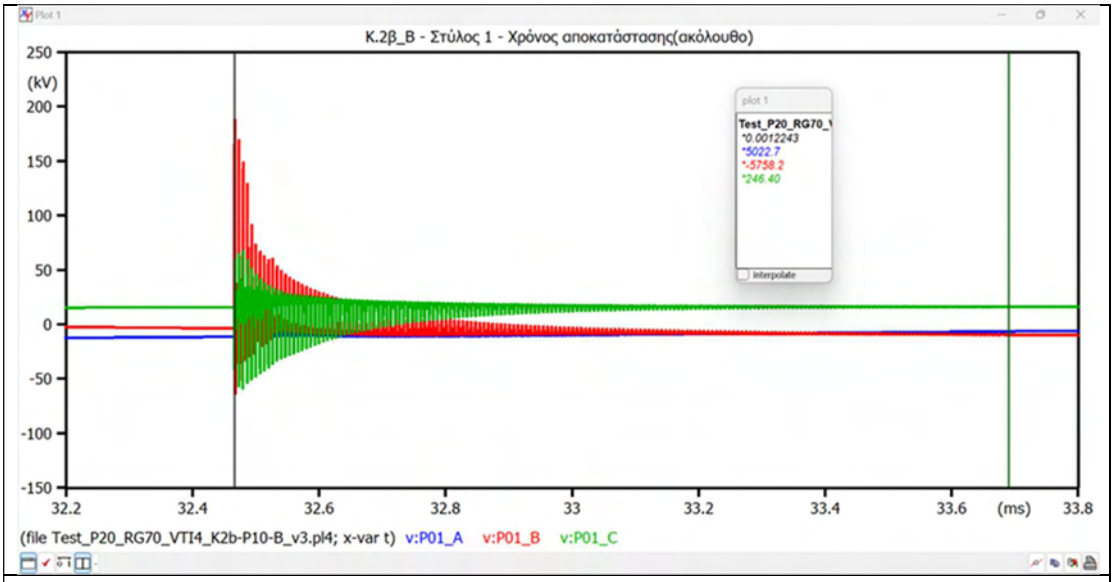
(δ)

Σχήμα 6-28 Στύλος P01: (α) Πρώτο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες και (δ) Κατώτατες τιμές ανά φάση (K.2.b_B)

Σενάριο 5 (K.2.b_B) - Στύλος P01: Ακόλουθο Πλήγμα

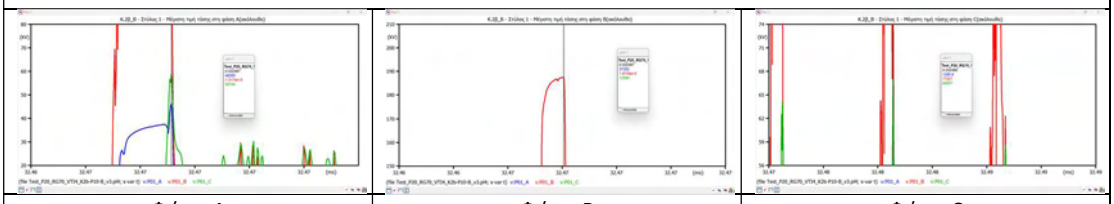


(α)



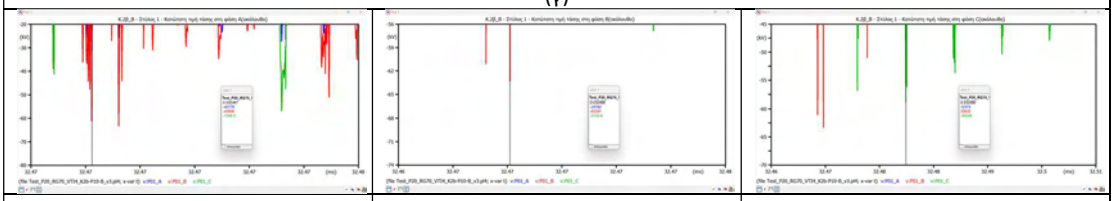
Χρόνος αποκατάστασης 0,0012243 s μετά το πλήγμα

(β)



Φάση A		Φάση B		Φάση C	
46,265 kV	32,467 ms	187,450 kV	32,467 ms	66,925 kV	32,480 ms

(γ)

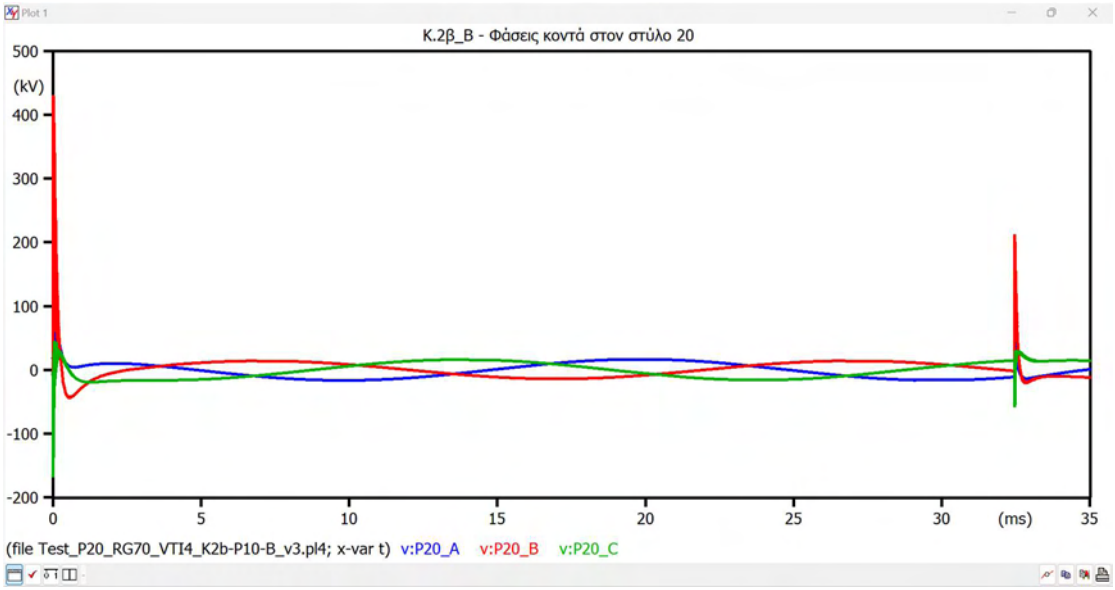


Φάση A		Φάση B		Φάση C	
-40,179 kV	32,467 ms	-63,291 kV	32,468 ms	-54,248 kV	32,480 ms

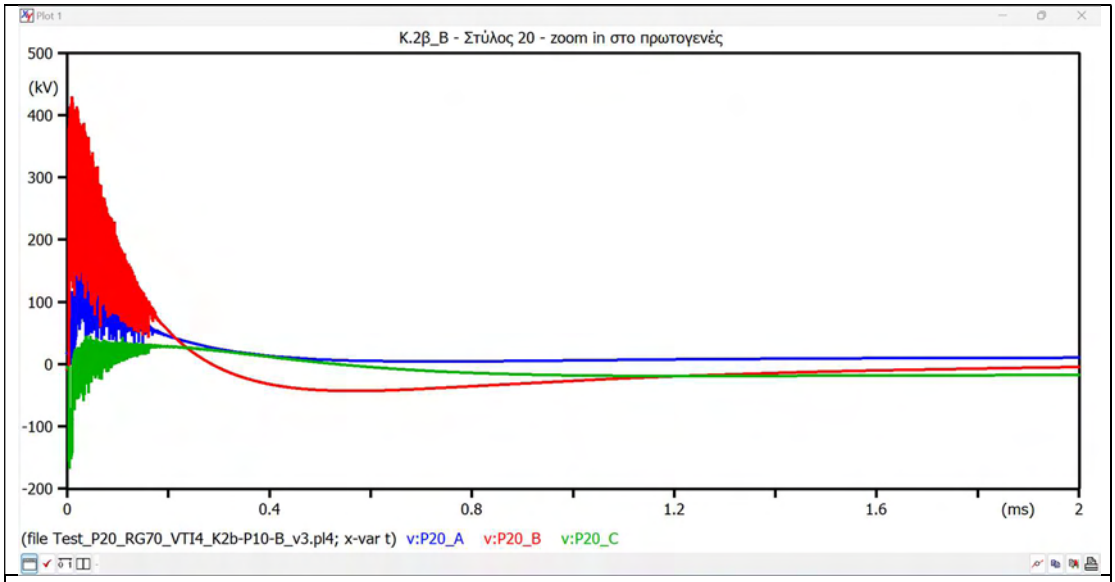
(δ)

Σχήμα 6-29 Στύλος P01: (α) Ακόλουθο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες και (δ) Κατώτατες τιμές ανά φάση (K.2.b_B)

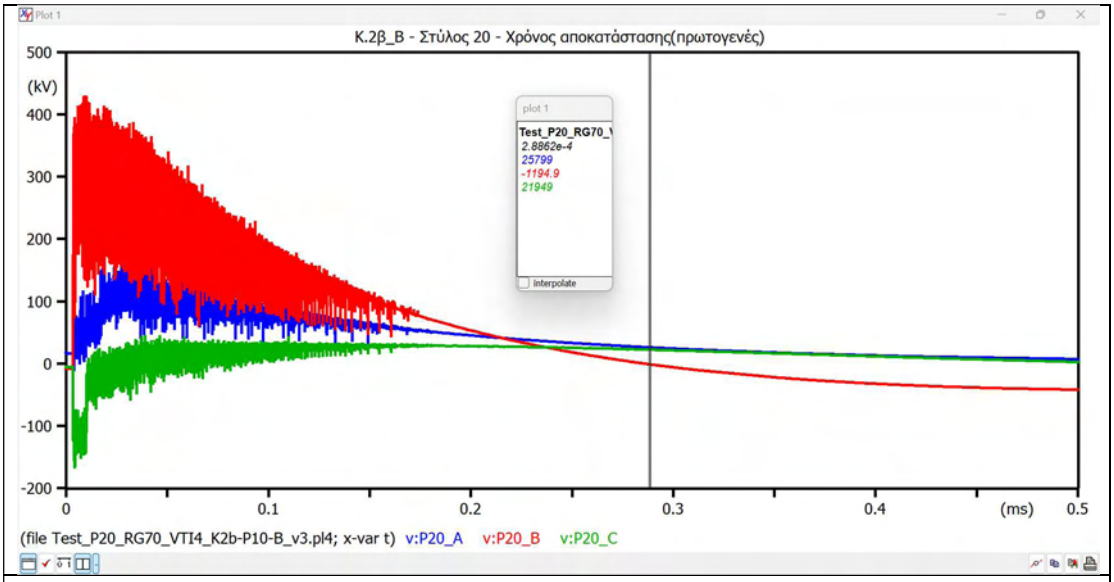
Σενάριο 5 (K.2.b_B) - Στύλος P20



Σενάριο 5 (K.2.b_B) - Στύλος P20: Πρώτο Πλήγμα

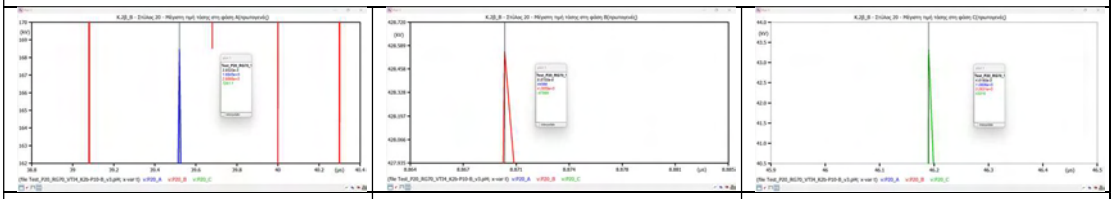


(α)



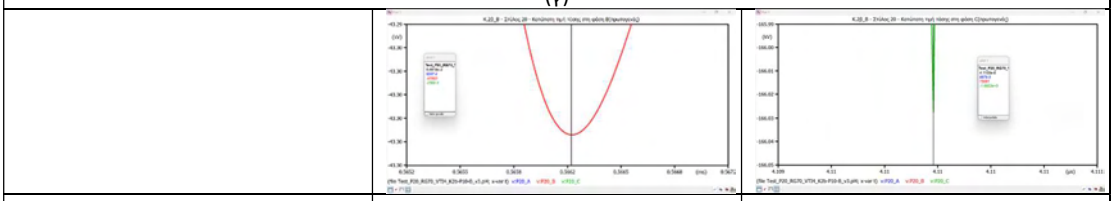
Χρόνος αποκατάστασης 0,00028862 s μετά το πλήγμα

(β)



Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
168,450 kV	39,520 μs	428,550 kV	8,870 μs	43,316 kV	4,619 μs

(γ)

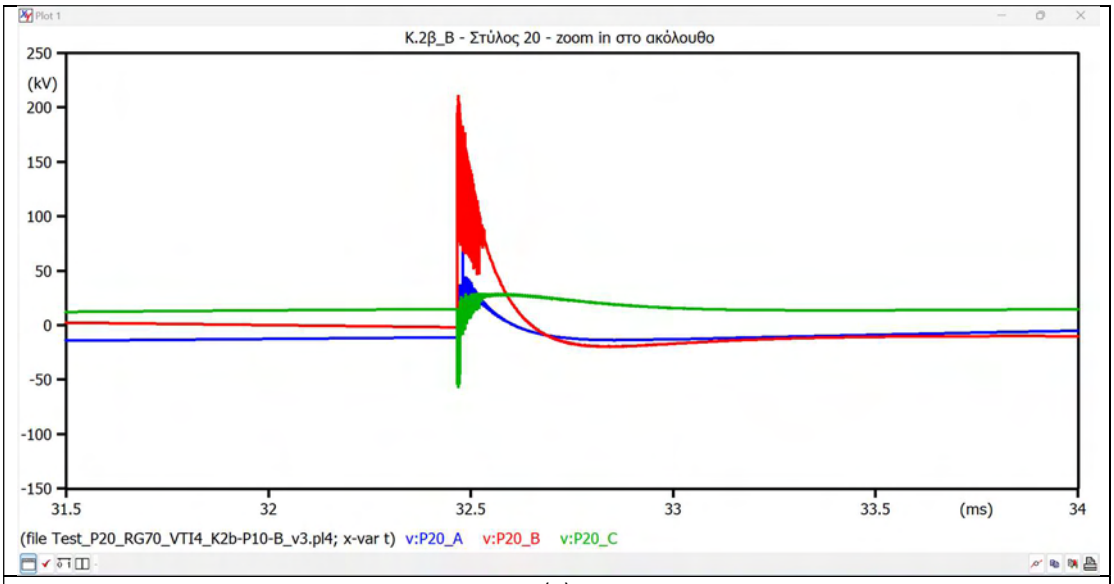


Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
		5,267 kV	566,180 μs	-166,030 kV	4,110 μs

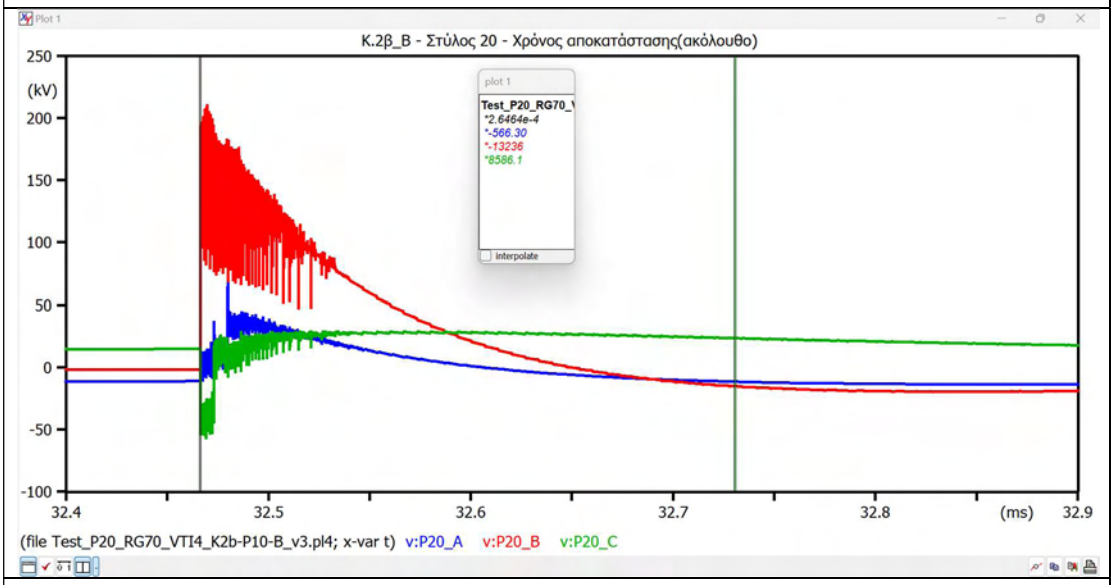
(δ)

Σχήμα 6-30 Στύλος P20: (α) Πρώτο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες και (δ) Κατώτατες τιμές ανά φάση (K.2.b_B)

Σενάριο 5 (Κ.2.b_Β) - Στύλος P20: Ακόλουθο Πλήγμα

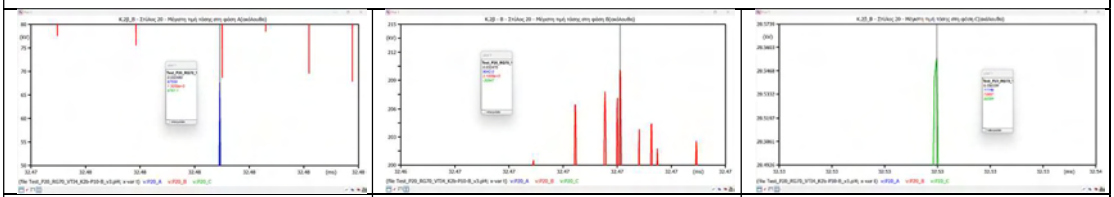


(α)



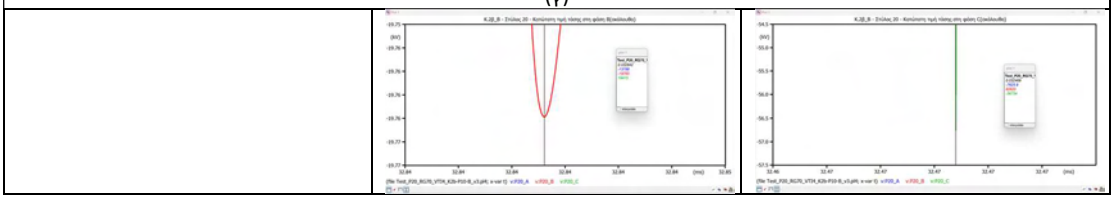
Χρόνος αποκατάστασης 0,00026464 s μετά το πλήγμα

(β)



Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
67,530 kV	32,480 ms	210,090 kV	32,470 ms	28,554 kV	32,534 ms

(γ)



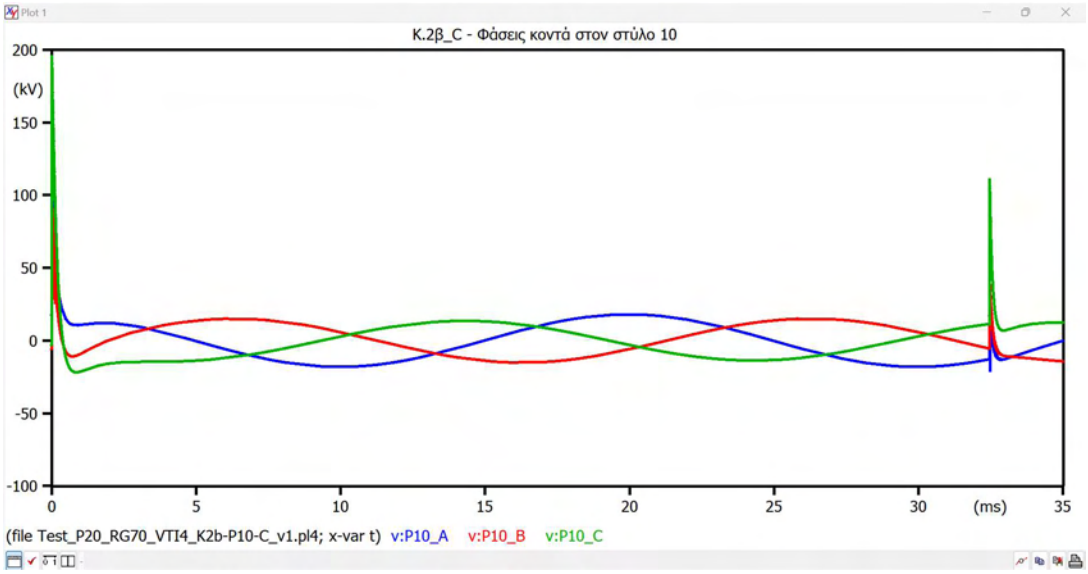
Φάση A		Φάση B		Φάση C	
		-19,765 kV	32,842 ms	-56,754 kV	32,469 ms
(δ)					

Σχήμα 6-31 Στύλος P20: (α) Ακόλουθο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες και (δ) Κατώτατες τιμές ανά φάση (K.2.b_B)

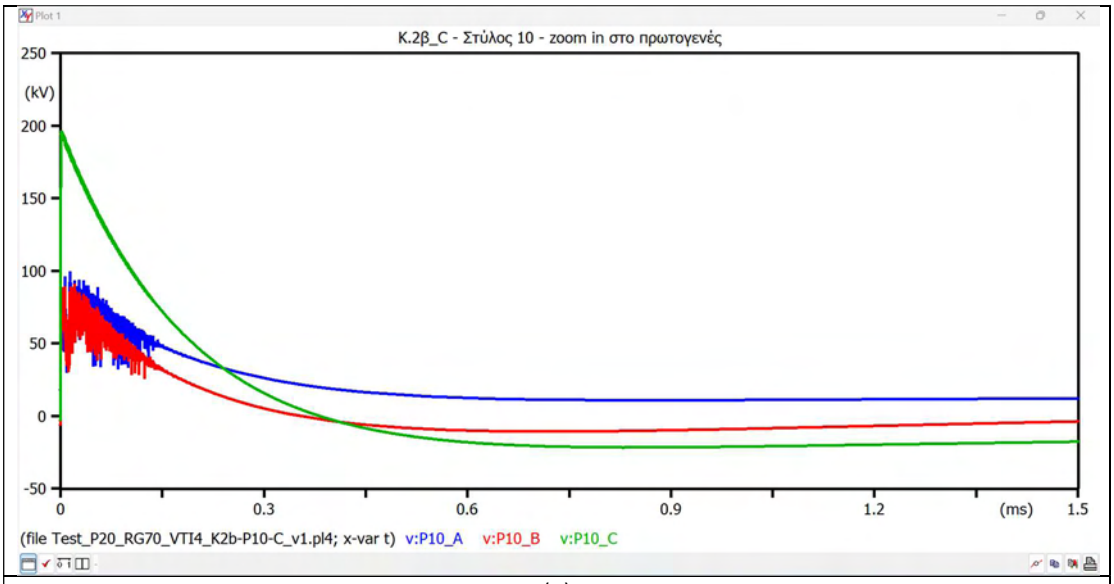
6.3.6 Σενάριο 6 (K.2.b_C)

K.2.b_C: Κεραυνικό Πρώτο πλήγμα ρεύματος κορυφής 100 kA και διαρκειών μετώπου/ουράς= 1/200 μs ακολουθούμενο από Ακόλουθο κεραυνικό πλήγμα ρεύματος κορυφής 50 kA και διαρκειών μετώπου/ουράς= 0.25/100 μs (K.2β), στη φάση C του 10^{ου} στύλου του δικτύου.

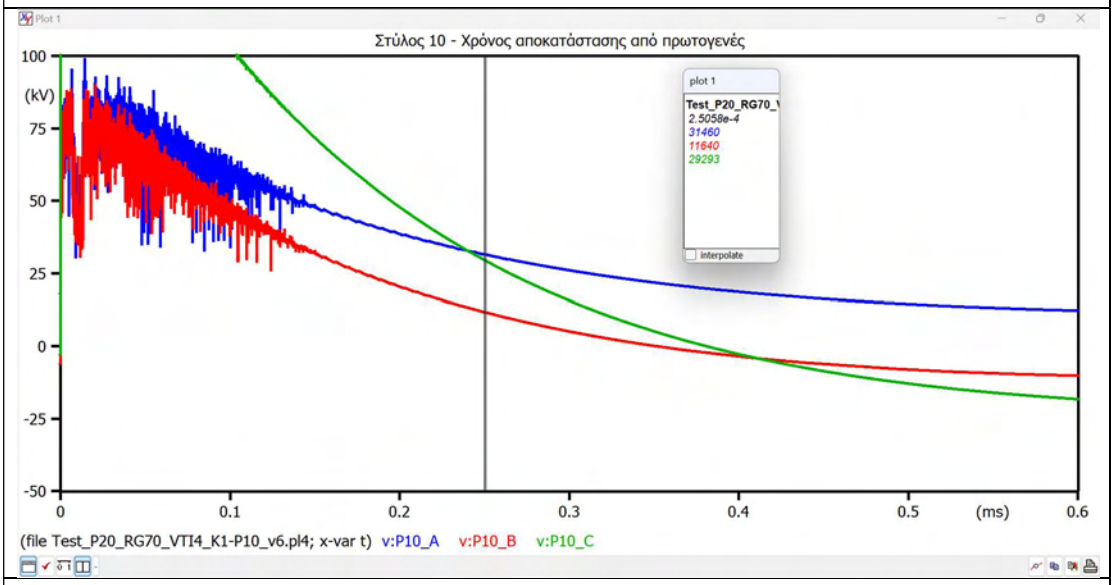
Σενάριο 6 (K.2.b_C) - Στύλος P10



Σενάριο 6 (Κ.2.b_C) - Στύλος P10: Πρώτο Πλήγμα

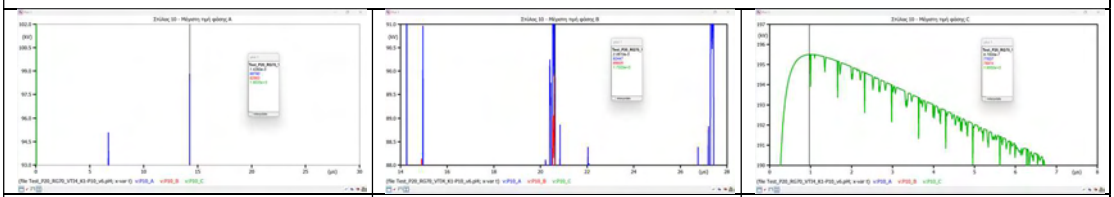


(α)



Χρόνος αποκατάστασης 0,00025058 s μετά το πλήγμα

(β)

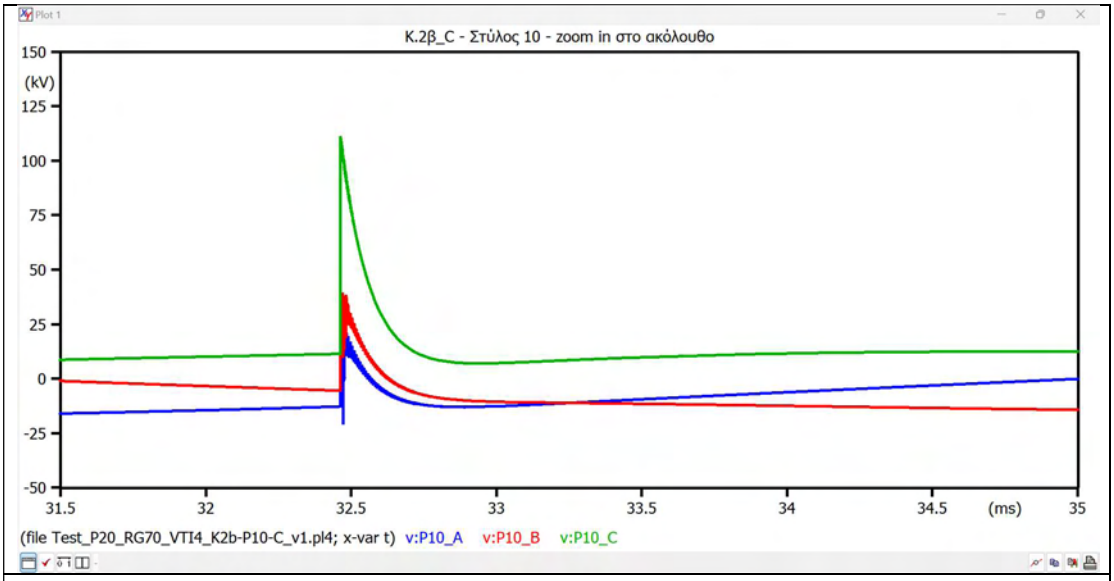


Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
98,790 kV	14,260 μs	89,925 kV	20,610 μs	195,500 kV	0,970 μs

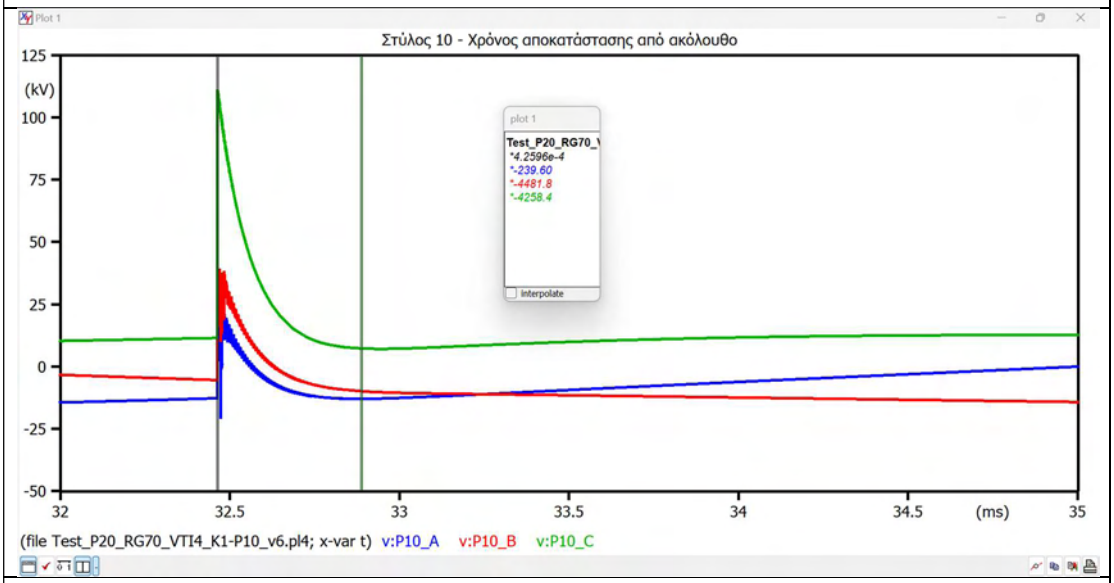
(γ)

Σχήμα 6-32 Στύλος P10: (α) Πρώτο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες τιμές ανά φάση (Κ.2.b_C)

Σενάριο 6 (K.2.b_C) - Στύλος P10: Ακόλουθο Πλήγμα

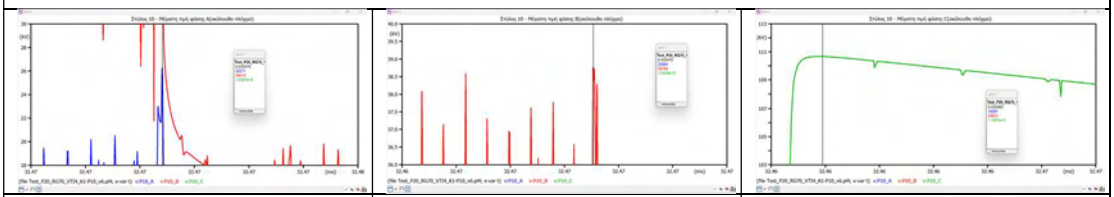


(α)



Χρόνος αποκατάστασης 0,00042596 s μετά το πλήγμα

(β)

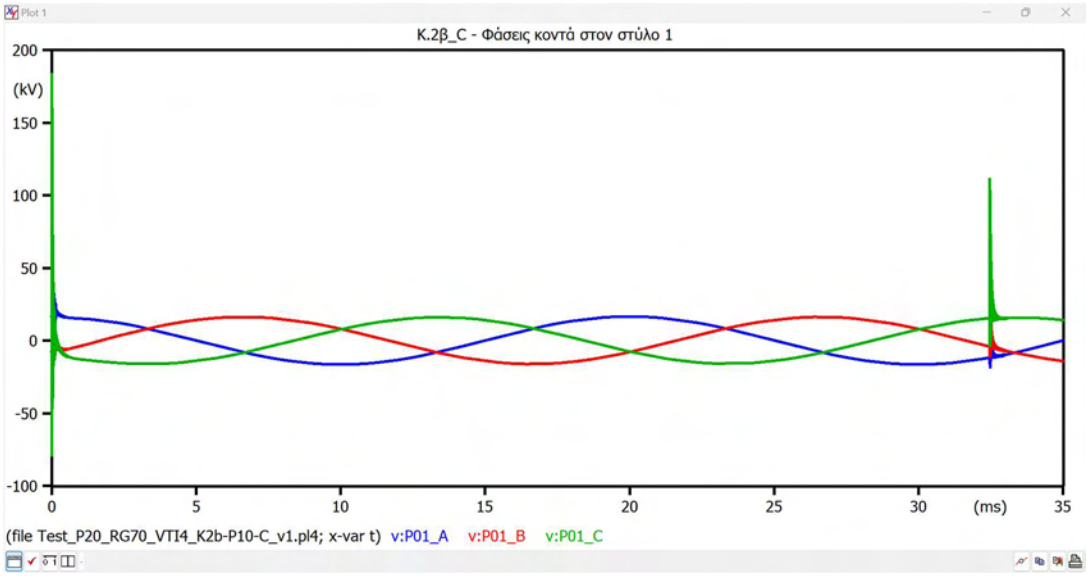


Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
26,271 kV	32,470 ms	38,768 kV	32,470 ms	110,670 kV	32,463 ms

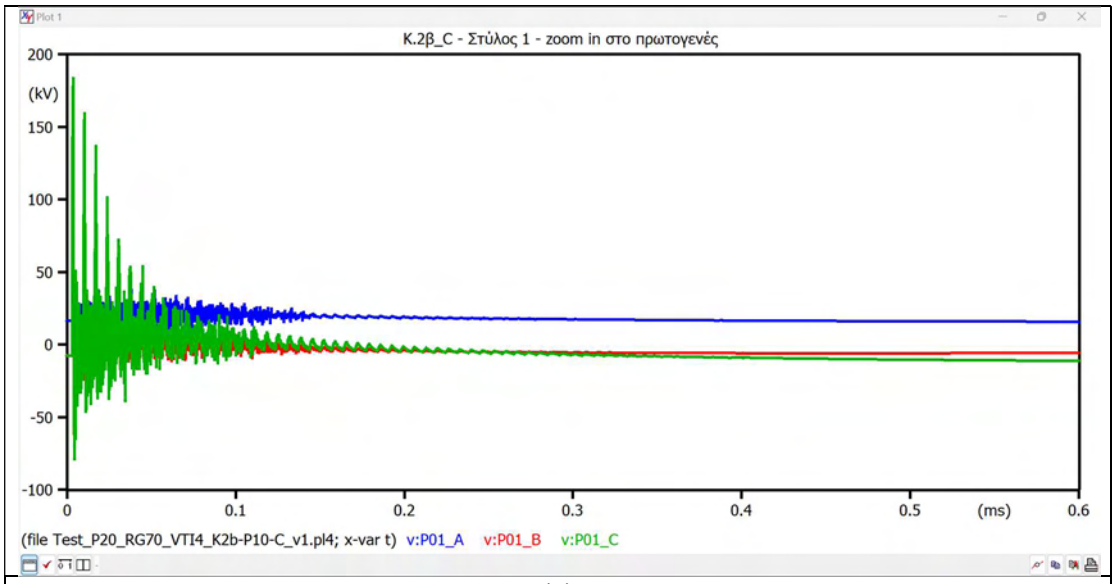
(γ)

Σχήμα 6-33 Στύλος P10: (α) Ακόλουθο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης και (γ) Μέγιστες τιμές ανά φάση (K.2.b_C)

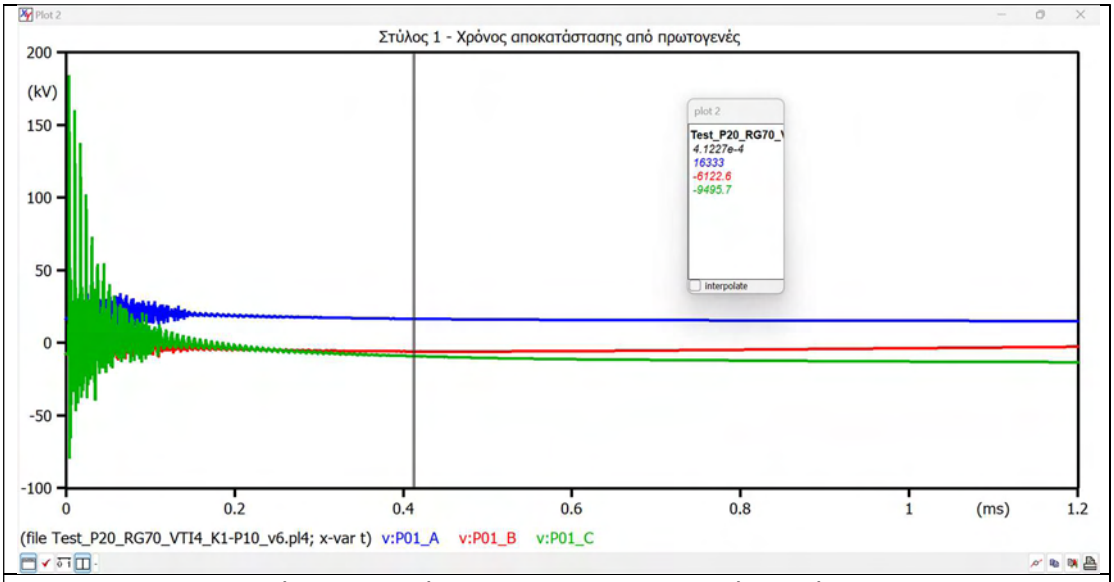
Σενάριο 6 (Κ.2.b_C) - Στύλος P01



Σενάριο 6 (Κ.2.b_C) - Στύλος P01: Πρώτο Πλήγμα

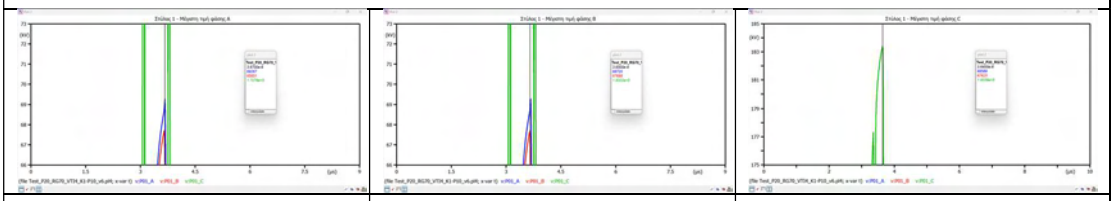


(α)



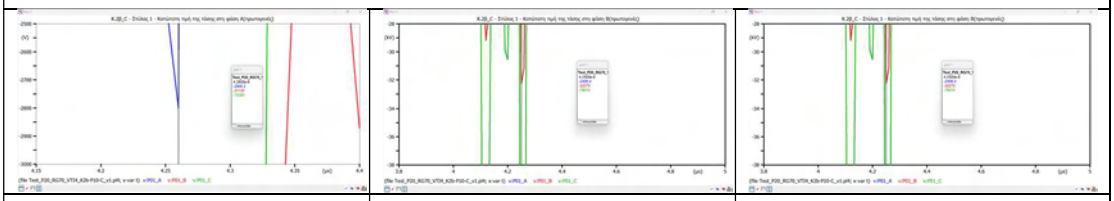
Χρόνος αποκατάστασης 0,00041227 s μετά το πλήγμα

(β)



Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
69,267 kV	3,670 μs	67,698 kV	3,650 μs	183,390 kV	3,640 μs

(γ)

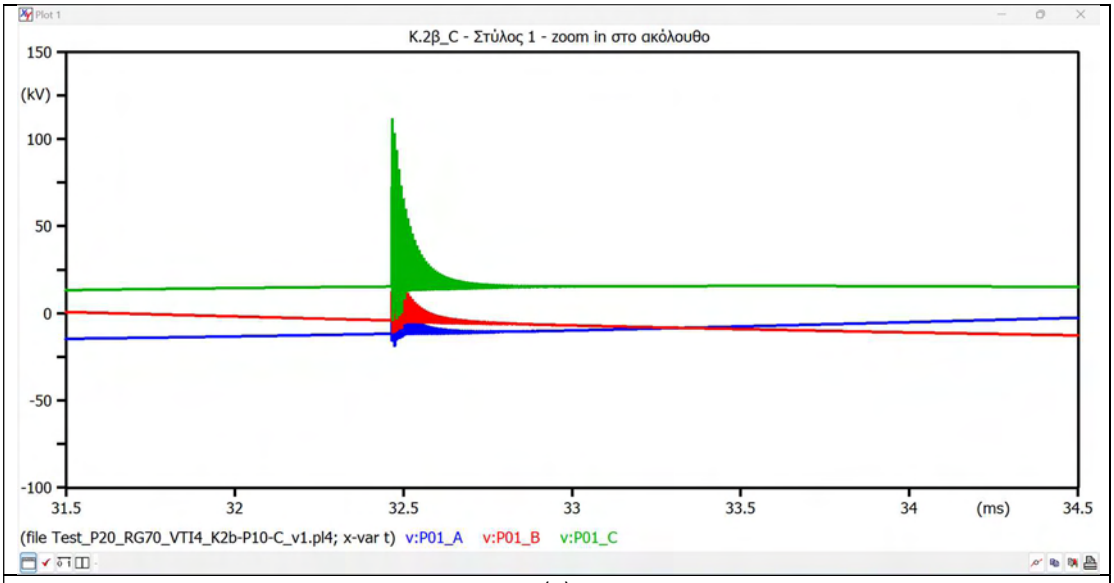


Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
-2,800 kV	4,260 μs	-32,279 kV	4,250 μs	-79,010 kV	4,250 μs

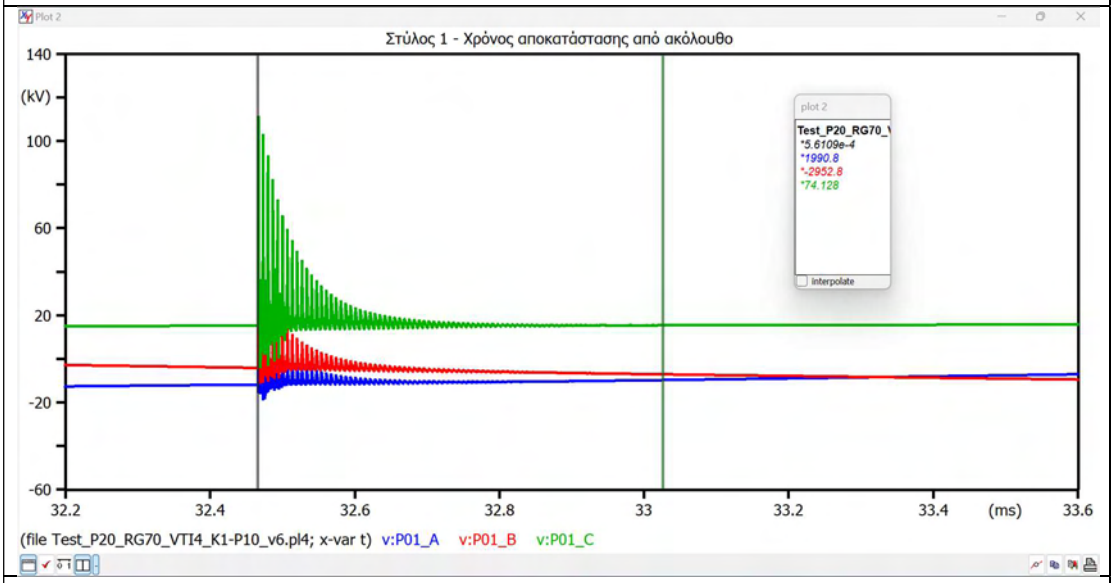
(δ)

Σχήμα 6-34 Στύλος P01: (α) Πρώτο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες και (δ) Κατώτατες τιμές ανά φάση (K.2.b_C)

Σενάριο 6 (Κ.2.b_C) - Στύλος P01: Ακόλουθο Πλήγμα

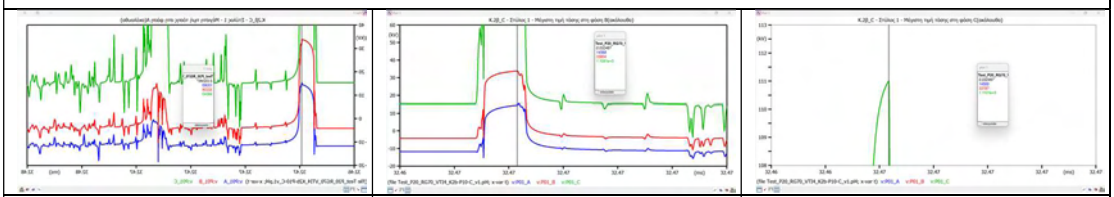


(α)



Χρόνος αποκατάστασης 0,00056109 s μετά το πλήγμα

(β)

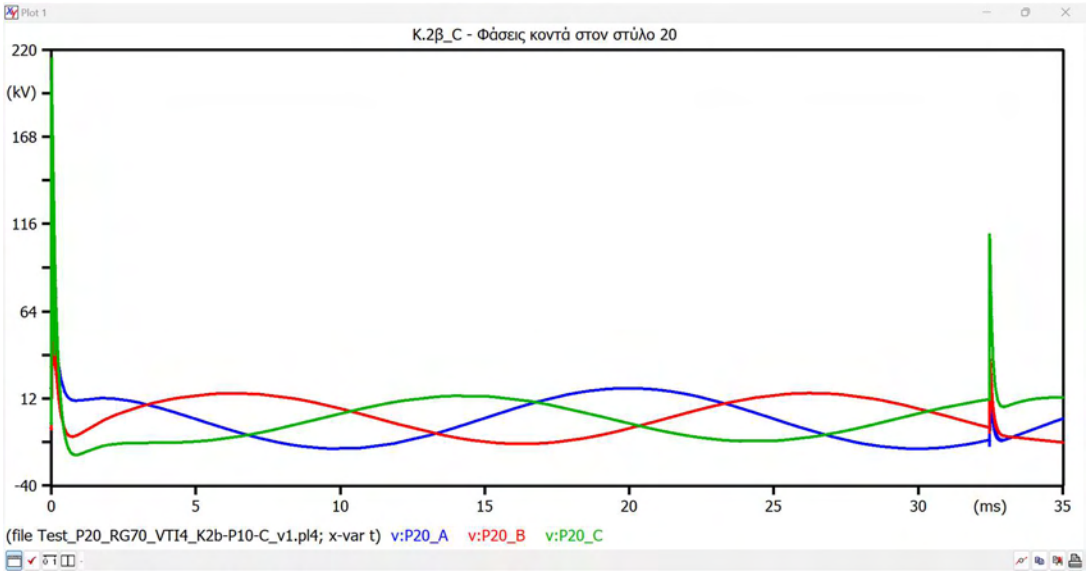


Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
15,365 kV	32,467 ms	33,804 kV	32,467 ms	111,010 kV	32,467 ms

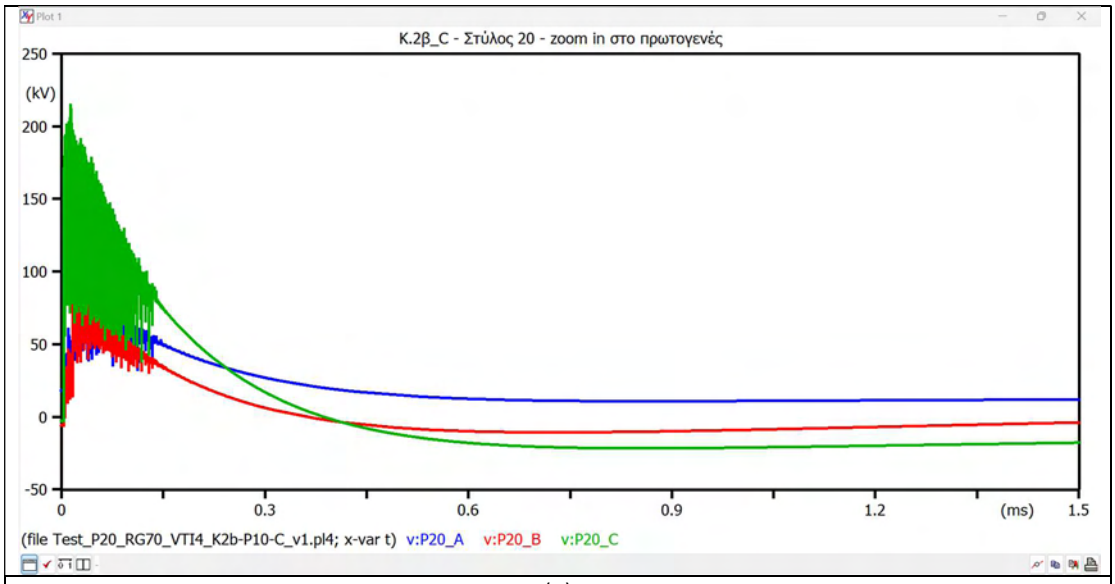
(γ)

Σχήμα 6-35 Στύλος P01: (α) Ακόλουθο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης και (γ) Μέγιστες τιμές ανά φάση (Κ.2.b_C)

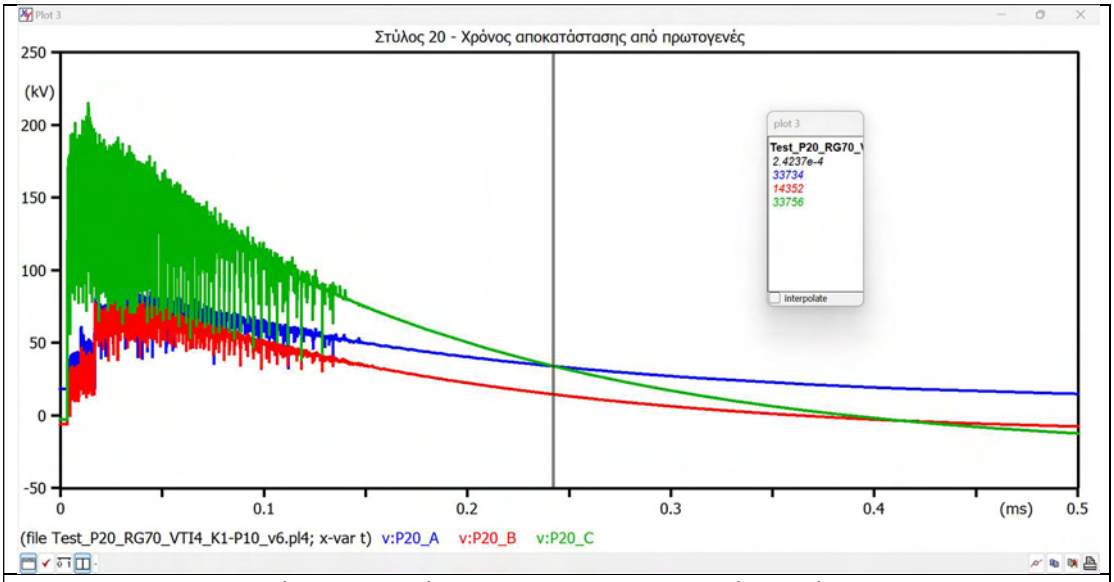
Σενάριο 6 (Κ.2.b_C) - Στύλος P20



Σενάριο 6 (Κ.2.b_C) - Στύλος P20: Πρώτο Πλήγμα

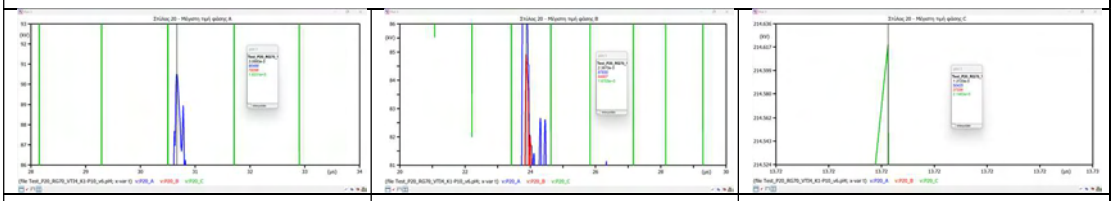


(α)



Χρόνος αποκατάστασης 0,00024237 s μετά το πλήγμα

(β)

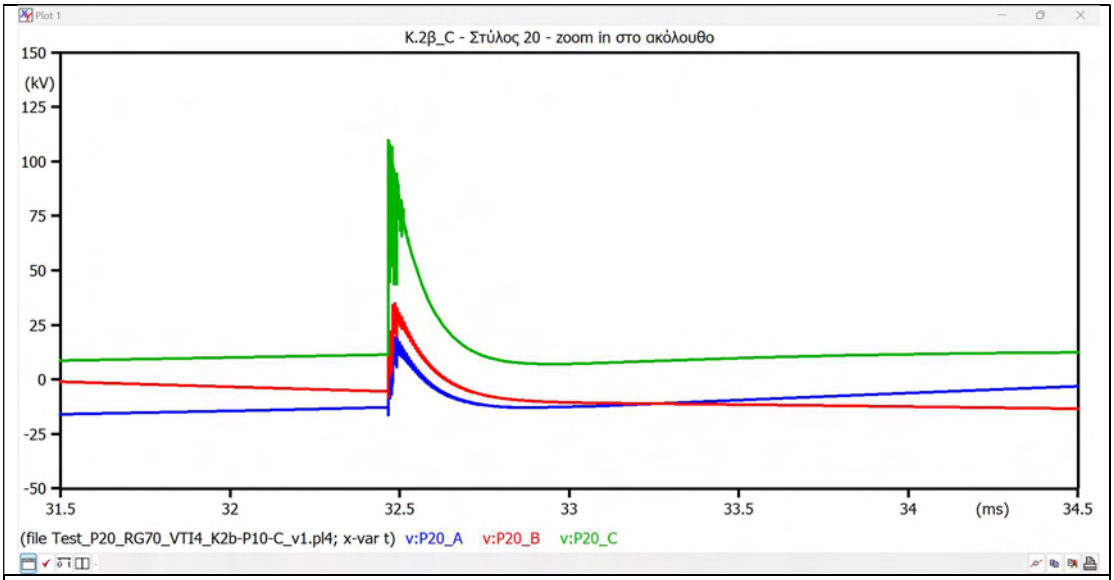


Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
90,488 kV	30,660 μs	84,907 kV	23,870 μs	214,620 kV	13,720 μs

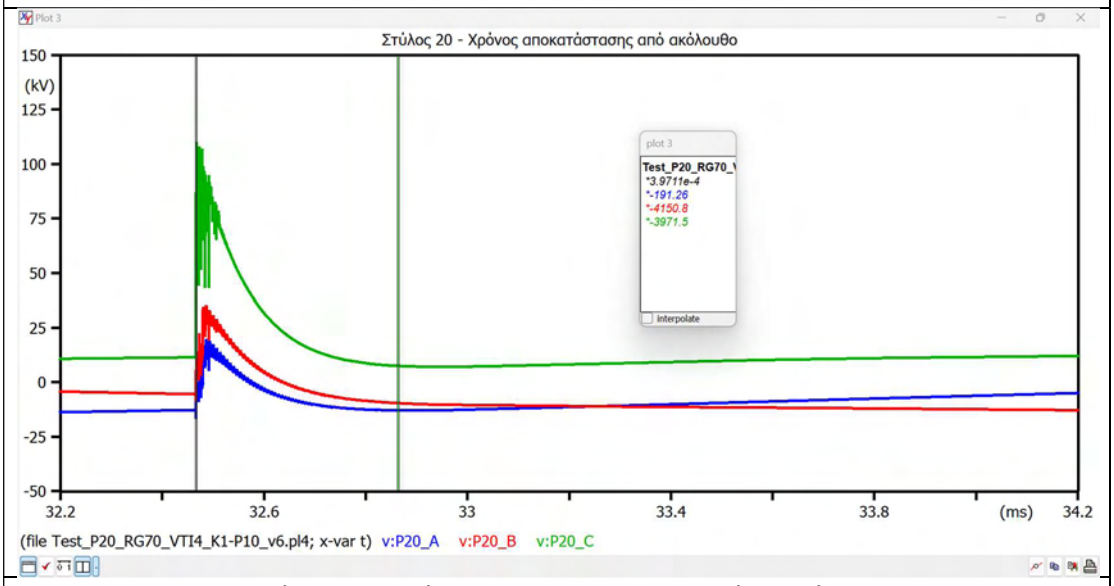
(γ)

Σχήμα 6-36 Στύλος P20: (α) Πρώτο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης, (γ) Μέγιστες τιμές ανά φάση (K.2.b_C)

Σενάριο 6 (K.2.b_C) - Στύλος P20: Ακόλουθο Πλήγμα

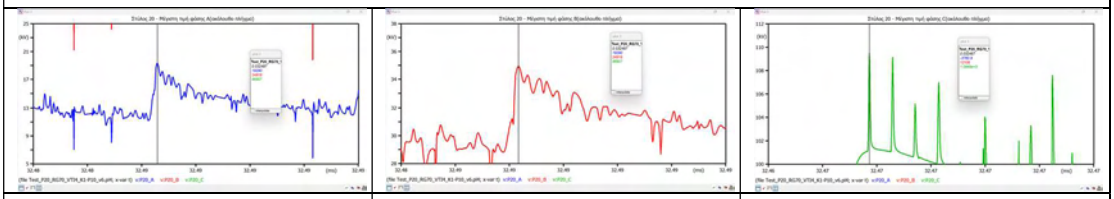


(α)



Χρόνος αποκατάστασης 0,00039711 s μετά το πλήγμα

(β)



Φάση Α		Φάση Β		Φάση C	
19,290 kV	32,487 ms	34,918 kV	32,487 ms	109,480 kV	32,467 ms

(γ)

Σχήμα 6-37 Στύλος P20: (α) Ακόλουθο Πλήγμα, (β) Χρόνος Αποκατάστασης και (γ) Μέγιστες τιμές ανά φάση (K.2.b_C)

7 Κεφάλαιο: Συμπεράσματα

7.1 Αποτελέσματα Δοκιμών

Στους πίνακες στη συνέχεια φαίνονται τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών του έγιναν ανά σενάριο δοκιμών. Οι πίνακες έχουν εμπλουτισθεί με θεωρητικά υπολογισμένες τιμές των τάσεων ανά φάση τη στιγμή που παρατηρήθηκαν οι μέγιστες και οι κατώτατες τιμές τάσης ανά φάση. Οι θεωρητικά υπολογισμένες τιμές επιβεβαιώθηκαν και πειραματικά στο ίδιο δίκτυο χωρίς την επίδραση πληγμάτων. Επίσης, οι πίνακες περιέχουν τις διαφορές ανάμεσα στις μέγιστες και κατώτατες τιμές ανά φάση σε τις θεωρητικά υπολογισμένες τιμές στους αντίστοιχους χρόνους. Τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται στους πίνακες είναι:

- t_a: ο χρόνος αποκατάστασης της τάσης σε ένα στύλο μετά από ένα πλήγμα.
- Pxx_Ph: ο στύλος xx και η φάση Ph.
- V_{ma} : η μέγιστη τιμή της τάσης που παρατηρήθηκε (ανά στύλο Pxx και φάση Ph)
- V_{min}: η κατώτατη τιμή της τάσης που παρατηρήθηκε (ανά στύλο Pxx και φάση Ph)
- $t(V_{max})$: ο χρόνος κατά τον οποίο παρατηρήθηκε η V_{ma} (ανά στύλο Pxx και φάση Ph)
- $t(V_{min})$: ο χρόνος κατά τον οποίο παρατηρήθηκε η V_{min} (ανά στύλο Pxx και φάση Ph)
- $V(t_{max})$: η τιμή που θα έπρεπε να είχε η τάση κατά το χρόνο $t(V_{max})$ (ανά στύλο Pxx και φάση Ph)
- $V(t_{min})$: η τιμή που θα έπρεπε να είχε η τάση κατά το χρόνο $t(V_{min})$ (ανά στύλο Pxx και φάση Ph)
- dV_{max}: η διαφορά $V_{max} - V(t_{max})$ (ανά στύλο Pxx και φάση Ph)
- dV_{min}: η διαφορά $V_{min} - V(t_{min})$ (ανά στύλο Pxx και φάση Ph)

Σενάριο 1 (K.2.a_A)

Πρώτο

ta (ms)	Pxx_Ph	Vmax (kV)	t(Vmax) (μs)	Vmin (kV)	t(Vmin) (μs)	Vtmax (kV)	Vtmin (kV)	dVmax (kV)	dVmin (kV)
1,495	P01_A	71,1	18,860			16,3		54,8	
	P01_B	6,1	32,890			-8,0		14,1	
	P01_C	6,2	32,900	-24,2	50,770	-8,3	-8,4	14,5	-15,8
0,072	P10_A	153,5	6,070			16,3		137,1	
	P10_B	30,8	6,700			-8,1		38,9	
	P10_C	-0,4	109,600			-8,6		8,2	
0,072	P20_A	172,0	88,600			16,3		155,7	
	P20_B	29,9	25,880			-8,0		37,9	
	P20_C	1,7	39,070	-40,6	8,010	-8,3	-8,2	10,1	-32,4

Ακόλουθο

ta (ms)	Pxx_Ph	Vmax (kV)	t(Vmax) (ms)	Vmin (kV)	t(Vmin) (ms)	Vtmax (kV)	Vtmin (kV)	dVmax (kV)	dVmin (kV)
1,615	P01_A	33,4	32,467			-11,7		45,1	
	P01_B	6,1	32,467			-4,1		10,2	
	P01_C	21,0	32,494			15,8		5,3	
0,442	P10_A	34,3	32,464			-11,7		46,0	
	P10_B	6,6	32,464			-4,0		10,6	
	P10_C	14,5	32,544			15,8		-1,4	
0,596	P20_A	33,4	32,467			-11,7		45,0	
	P20_B	4,1	32,480			-4,1		8,3	
	P20_C	15,3	32,500			15,8		-0,5	

Σενάριο 2 (K.2.a_B)

Πρώτο

ta (ms)	Pxx_Ph	Vmax (kV)	t(Vmax) (μs)	Vmin (kV)	t(Vmin) (μs)	Vtmax (kV)	Vtmin (kV)	dVmax (kV)	dVmin (kV)
	P01_A	31,6	17,860			16,3		15,3	
1,394	P01_B	42,6	4,100	-23,6	8,000	-8,1	-8,1	50,7	-15,5
	P01_C	2,6	27,420	-21,6	7,089	-8,3	-8,2	10,9	-13,4
	P10_A	58,2	6,450			16,3		41,9	
0,367	P10_B	129,2	6,000			-8,1		137,3	
	P10_C	1,4	109,160			-8,6		10,0	
	P20_A	55,6	21,500			16,3		39,3	
0,263	P20_B	141,8	9,160	-18,4	306,450	-8,1	-6,8	149,9	-11,6
	P20_C	2,9	85,720	-54,3	9,650	-8,5	-8,2	11,4	-46,1

Ακόλουθο

ta (ms)	Pxx_Ph	Vmax (kV)	t(Vmax) (ms)	Vmin (kV)	t(Vmin) (ms)	Vtmax (kV)	Vtmin (kV)	dVmax (kV)	dVmin (kV)
	P01_A	-0,1	32,467			-11,7		11,6	
1,299	P01_B	41,4	32,467			-4,1		45,5	
	P01_C	20,7	32,501			15,8		5,0	
	P10_A	1,8	32,464			-11,7		13,4	
0,352	P10_B	45,1	32,464	-18,5	0,303	-4,0	-6,8	49,1	-11,7
	P10_C	16,3	32,537			15,8		0,5	
	P20_A	-0,3	32,480			-11,6		11,3	
0,407	P20_B	45,1	32,467			-4,1		49,2	
	P20_C	17,2	35,000			14,1		3,1	

Σενάριο 3 (K.2.a_C)

Πρώτο

ta (ms)	Pxx_Ph	Vmax (kV)	t(Vmax) (μs)	Vmin (kV)	t(Vmin) (μs)	Vtmax (kV)	Vtmin (kV)	dVmax (kV)	dVmin (kV)
	P01_A	23,6	4,210			16,3		7,3	
0,508	P01_B	2,3	4,160			-8,1		10,4	
	P01_C	17,8	4,110			-8,2		25,9	
	P10_A	39,8	6,950			16,3		23,5	
0,265	P10_B	23,7	6,790			-8,1		31,8	
	P10_C	66,5	6,040			-8,2		74,7	
	P20_A	38,5	31,720			16,3		22,2	
0,243	P20_B	21,7	25,250			-8,1		29,7	
	P20_C	61,3	13,390			-8,2		69,5	

Ακόλουθο

ta (ms)	Pxx_Ph	Vmax (kV)	t(Vmax) (ms)	Vmin (kV)	t(Vmin) (ms)	Vtmax (kV)	Vtmin (kV)	dVmax (kV)	dVmin (kV)
	P01_A	-5,5	32,470			-11,7		6,1	
0,419	P01_B	4,7	32,467			-4,1		8,8	
	P01_C	37,9	32,467			15,7		22,2	
	P10_A	-5,6	32,470			-11,7		6,1	
0,230	P10_B	0,4	32,464			-4,0		4,5	
	P10_C	35,3	32,464			15,7		19,5	
	P20_A	-6,6	32,487			-11,6		5,0	
0,198	P20_B	2,4	32,480			-4,1		6,6	
	P20_C	33,1	32,467			15,7		17,4	

Σενάριο 4 (K.2.b_A)

Πρώτο

ta (ms)	Pxx_Ph	Vmax (kV)	t(Vmax) (μs)	Vmin (kV)	t(Vmin) (μs)	Vtmax (kV)	Vtmin (kV)	dVmax (kV)	dVmin (kV)
	P01_A	392,3	3,530	-98,4	3,950	16,3	16,3	376,0	-114,7
1,097	P01_B	89,1	3,760	-60,2	23,450	-8,1	-8,1	97,3	-52,2
	P01_C	57,8	8,050	-130,1	9,880	-8,2	-8,2	66,0	-121,9
	P10_A	409,1	1,020	-23,7	583,280	16,3	16,1	392,8	-39,8
0,225	P10_B	147,1	8,100			-8,1		155,2	
	P10_C	18,4	182,190			-9,0		27,3	
	P20_A	457,6	16,360	-23,5	593,230	16,3	16,0	441,2	-39,6
0,211	P20_B	157,1	29,410	-60,3	7,170	-8,0	-8,1	165,1	-52,2
	P20_C	39,5	83,630	-139,2	7,750	-8,5	-8,2	48,0	-131,0

Ακόλουθο

ta (ms)	Pxx_Ph	Vmax (kV)	t(Vmax) (ms)	Vmin (kV)	t(Vmin) (ms)	Vtmax (kV)	Vtmin (kV)	dVmax (kV)	dVmin (kV)
	P01_A	179,3	32,467	-65,9	32,467	-11,7	-11,7	191,0	-54,2
1,538	P01_B	53,5	32,467	-34,7	32,467	-4,1	-4,1	57,6	-30,7
	P01_C	58,6	32,480	-50,0	32,487	15,7	15,8	42,9	-65,7
	P10_A	183,8	32,463	-28,2	32,825	-11,7	-10,3	195,5	-17,9
0,890	P10_B	59,1	32,470			-4,1		63,2	
	P10_C	22,3	32,597			15,9		6,5	
	P20_A	199,8	32,469	-28,1	32,841	-11,7	-10,2	211,4	-17,9
0,168	P20_B	45,2	32,487	-30,1	32,466	-4,2	-4,1	49,4	-26,1
	P20_C	23,6	32,581	-40,1	32,466	15,9	15,7	7,7	-55,8

Σενάριο 5 (K.2.b_B)

Πρώτο

ta (ms)	Pxx_Ph	Vmax (kV)	t(Vmax) (μs)	Vmin (kV)	t(Vmin) (μs)	Vtmax (kV)	Vtmin (kV)	dVmax (kV)	dVmin (kV)
	P01_A	109,9	3,560	-24,8	36,770	16,3	16,3	93,5	-41,2
1,099	P01_B	368,7	3,560	-119,8	4,790	-8,1	-8,1	376,8	-111,6
	P01_C	68,5	12,980	-147,9	23,370	-8,2	-8,3	76,7	-139,6
	P10_A	373,7	1,020			16,3		357,3	
0,183	P10_B	384,4	1,010	-43,5	562,810	-8,2	-5,6	392,6	-38,0
	P10_C	26,6	175,240	-19,4	1.256,200	-8,9	-13,0	35,5	-6,4
	P20_A	168,5	39,520			16,3		152,1	
0,289	P20_B	428,6	8,870	5,3	566,180	-8,1	-5,5	436,7	10,8
	P20_C	43,3	4,619	-166,0	4,110	-8,2	-8,2	51,5	-157,8

Ακόλουθο

ta (ms)	Pxx_Ph	Vmax (kV)	t(Vmax) (ms)	Vmin (kV)	t(Vmin) (ms)	Vtmax (kV)	Vtmin (kV)	dVmax (kV)	dVmin (kV)
	P01_A	46,3	32,467	-40,2	32,467	-11,7	-11,7	57,9	-28,5
1,224	P01_B	187,5	32,467	-63,3	32,468	-4,1	-4,1	191,5	-59,2
	P01_C	66,9	32,480	-54,2	32,480	15,7	15,7	51,2	-70,0
	P10_A	158,9	32,477	-45,0	32,474	-11,6	-11,6	170,5	-33,4
0,216	P10_B	194,3	32,463	-2,0	32,838	-4,0	-5,9	198,3	3,9
	P10_C	26,6	0,175			-8,9		35,5	
	P20_A	67,5	32,480			-11,6		79,1	
0,265	P20_B	210,1	32,470	-19,8	32,842	-4,1	-5,9	214,2	-13,9
	P20_C	28,6	32,534	-56,8	32,469	15,8	15,7	12,7	-72,5

Σενάριο 6 (K.2.b_C)

Πρώτο

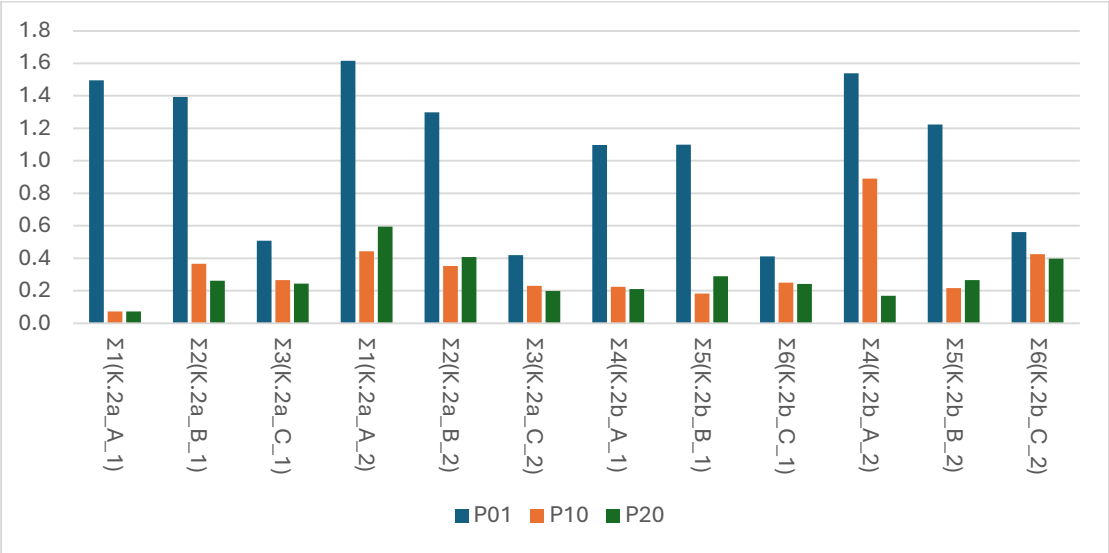
ta (ms)	Pxx_Ph	Vmax (kV)	t(Vmax) (μs)	Vmin (kV)	t(Vmin) (μs)	Vtmax (kV)	Vtmin (kV)	dVmax (kV)	dVmin (kV)
0,412	P01_A	69,3	3,670	-2,8	4,260	16,3	16,3	52,9	-19,1
	P01_B	67,7	3,650	-32,3	4,250	-8,1	-8,1	75,8	-24,1
	P01_C	183,4	3,640	-79,0	4,250	-8,2	-8,2	191,6	-70,8
0,251	P10_A	98,8	14,260			16,3		82,5	
	P10_B	89,9	20,610			-8,1		98,0	
	P10_C	195,5	0,970			-8,2		203,7	
0,242	P20_A	90,5	30,660			16,3		74,2	
	P20_B	84,9	23,870			-8,1		93,0	
	P20_C	214,6	13,720			-8,2		222,8	

Ακόλουθο

ta (ms)	Pxx_Ph	Vmax (kV)	t(Vmax) (ms)	Vmin (kV)	t(Vmin) (ms)	Vtmax (kV)	Vtmin (kV)	dVmax (kV)	dVmin (kV)
0,561	P01_A	15,4	32,467			-11,7		27,0	
	P01_B	33,8	32,467			-4,1		37,9	
	P01_C	111,0	32,467			15,7		95,3	
0,426	P10_A	26,3	32,470			-11,7		37,9	
	P10_B	38,8	32,470			-4,1		42,8	
	P10_C	110,7	32,463			15,7		94,9	
0,397	P20_A	19,3	32,487			-11,6		30,9	
	P20_B	34,9	32,487			-4,2		39,1	
	P20_C	109,5	32,467			15,7		93,8	

7.2 Συμπεράσματα: Χρόνος Αποκατάστασης

Σε όλα τα σενάρια και τις περιπτώσεις ο χρόνος αποκατάστασης της κανονικής λειτουργίας στο 1ο στύλο (P01) είναι πολλαπλάσιος των άλλων δύο (P10 και P20). Στην καλύτερη περίπτωση στο Ακόλουθο πλήγμα στο Σενάριο 6 (K.2b_C_2) είναι μεγαλύτερος κατά 32% και στη χειρότερη στο Πρώτο πλήγμα στο Σενάριο 1 είναι 20πλάσιος (K.2a_A_1). Οι χρόνοι αποκατάστασης της κανονικής λειτουργίας στους δύο άλλους στύλους διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους εκτός της περίπτωσης του Ακόλουθου πλήγματος στο Σενάριο 4 (K.2b_A_2) όπου ο χρόνος αποκατάστασης του 10ου στύλου (P10) είναι περίπου 5πλάσιος από αυτόν του 20ου. (P20)



Σχήμα 7-1 Χρόνος αποκατάστασης κανονικής λειτουργίας (ms) ανά στύλο και σενάριο δοκιμής.

Επίσης παρατηρείται ότι στα σενάρια όπου τα πλήγματα εφαρμόζονται στη φάση C (Σενάρια 3 και 6) ο χρόνος αποκατάστασης μετά από Πρώτο πλήγμα στον 1ο στύλο (P01) είναι τουλάχιστον υποδιπλάσιος από αυτούς στα υπόλοιπα σενάρια.

7.3 Συμπεράσματα: Επίδραση πληγμάτων ανά Φάση

Σημείωση: Με τον όρο "θετική υπέρταση" αναφερόμαστε στην τιμή του dV_{ma} και με τον όρο "αρνητική υπέρταση" αναφερόμαστε στην τιμή του dV_{min}

Παρατηρείται σε όλες τις περιπτώσεις χωρίς εξαίρεση, όπως και ήταν αναμενόμενο, ότι η μεγαλύτερη θετική υπέρταση να εμφανίζεται στη φάση στην οποία εφαρμόζονται τα κεραυνικά πλήγματα.

Οι περιπτώσεις K2.β (Σενάρια 3 έως 6) εμφανίζουν από μέτριες έως μεγάλες αρνητικές υπερτάσεις ενώ οι περιπτώσεις K2.α (Σενάρια 1 έως 3) εμφανίζουν σπάνια κάποιες μικρές αρνητικές υπερτάσεις. Αυτό που παρατηρείται εύκολα είναι ότι στη φάση C εμφανίζονται οι μεγαλύτερες τιμές αρνητικών υπερτάσεων σε όλα τα σενάρια χωρίς εξαίρεση.

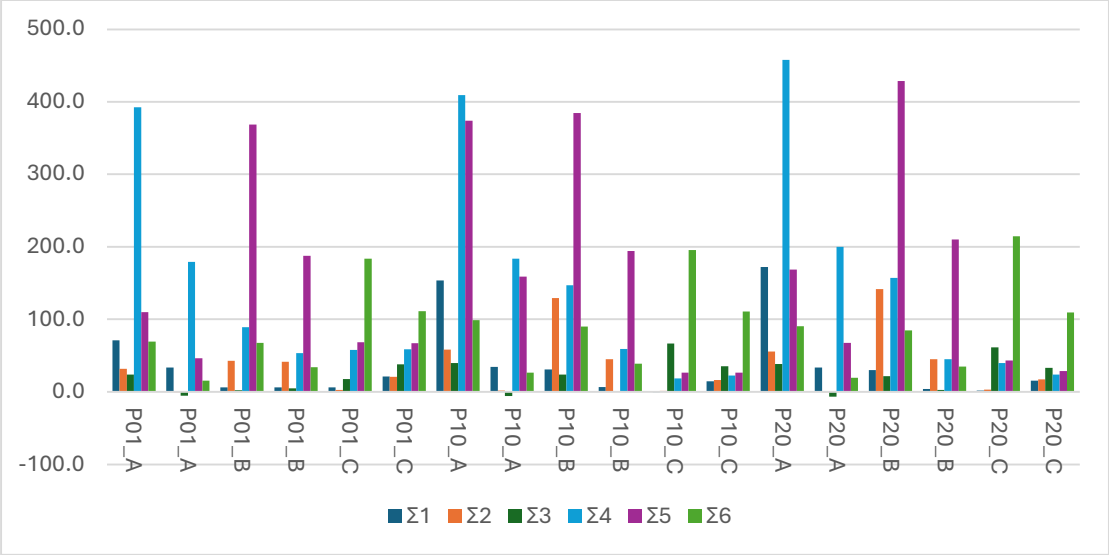
Σε όλες τις περιπτώσεις πλην τριών εξαιρέσεων (K2a_A/ακόλουθο/20ος στύλος, K2b_B/ πρώτο/20ος στύλος, K2b_B/ πρώτο /10ος στύλος) η πρώτη υπέρταση λαμβάνει χώρα στη φάση στην οποία εφαρμόζεται το πλήγμα.

Στα σενάρια στα οποία το κεραυνικό πλήγμα εφαρμόζεται είτε στη φάση A είτε στη B δηλαδή τα Σενάρια 1, 2, 4 και 5 παρατηρείται το εξής φαινόμενο: Η τελευταία υπέρταση που

λαμβάνει χώρα (όσον αφορά τα πρώτα πλήγματα) είναι στη φάση C του 10ου στύλου δηλαδή του στύλου πάνω στον οποίο εφαρμόζεται το πλήγμα που σημαίνει ότι το κύμα πρώτα ταξίδεψε και προκάλεσε τις μέγιστες υπερτάσεις στις φάσεις των άκρων του δικτύου και έπειτα συνέβη η μέγιστη θετική υπέρταση της φάσης C. Η χρονική στιγμή μάλιστα αυτή έχει χρονική διαφορά από 21 έως 135 μs από την προτελευταία μέγιστη υπέρταση.

7.4 Συμπεράσματα: Επίδραση πληγμάτων ανά Στύλο

Ο 20ος στύλος (P20) στη μεγάλη πλειοψηφία των περιπτώσεων δείχνει να εμφανίζει μεγαλύτερες θετικές υπερτάσεις σε σχέση με τον 10ο στύλο (P10) στον οποίο εφαρμόζονται τα πλήγματα (Σχήμα 7-2).



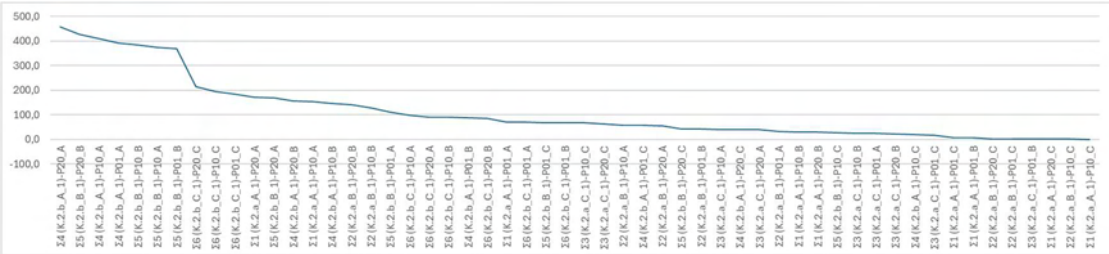
Σχήμα 7-2 Θετικές υπερτάσεις (kV) ανά στύλο, φάση και σενάριο δοκιμών.

Ο 1ος στύλος (P01) στις περιπτώσεις κ2.β έχει την τάση να παρουσιάζει συχνότερες και μεγαλύτερες τιμές αρνητικών υπερτάσεων σε σχέση με τους άλλους δύο.

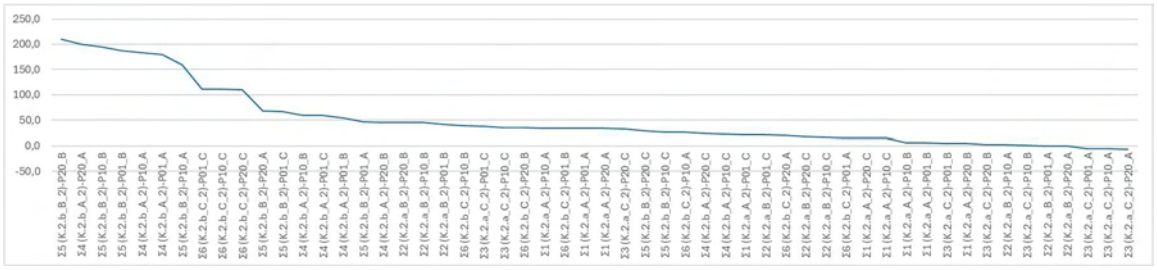
7.5 Συμπεράσματα: Επίδραση Πρώτων και Ακόλουθων Πληγμάτων

Οι χρόνοι αποκατάστασης από πρώτα και ακόλουθα πλήγματα είναι πολύ κοντά μεταξύ τους με διαφορές που σπάνια ξεπερνούν τα 0.1 ms.

Όπως είναι αναμενόμενο οι θετικές υπερτάσεις είναι πάντα υψηλότερες στις περιπτώσεις των Πρώτων σε σχέση με αυτές των Ακολούθων πληγμάτων με ποσοστιαίες αυξήσεις που κυμαίνονται από 11% έως και 300%. Παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις (Πρώτων και Ακολούθων πληγμάτων) τα Σενάρια με τις μέγιστες τιμές είναι τα Σενάρια 4, 5 και 6 (Σχήμα 7-3). Αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί από τις υψηλές τιμές κεραυνικού πλήγματος αυτών των σεναρίων έναντι των υπολοίπων.



(α)



(β)

Σχήμα 7-3 Θετικές υπερτάσεις (kV) σε φθίνουσα σειρά ανά περίπτωση δοκιμής (α) Πρώτα (β) Ακόλουθα πλήγματα.

Οι περιπτώσεις για τις οποίες η φθίνουσα διάταξη των Σεναρίων 4, 5 και 6, όχι πάντα με αυτή τη σειρά, δεν διατηρείται είναι αυτές που παρατηρούνται στη φάση την οποία έπληξε ο κεραυνός στο εκάστοτε σενάριο.

8 Bibliography

Alvarado, F. και συν., 1989. *Electromagnetic Transients Program (EMTP) - Workbook II.* EPRI EL-4651, Volume 2 επιμ. s.l.:Electric Power Research Institute.

Ametani, A. & Kawamura, T., 2005. A method of a lightning surge analysis recommended in Japan using EMTP. *IEEE Transactions on Power Delivery,* 20(2), pp. 867-875.

Anderson, R. B. & Eriksson. , A. J., 1980. Lightning Parameters for Engineering Application. *Electra,* Τόμος 69, pp. 65-102.

Anon., 2010. *IEC 62305-1 (Protection against lightning - Part 1: General principles_,* s.l.: Iinternational Electrotechnical Commission.

Bedoui, S., Bayadi, A. & Haddad, A. M., 2010. Analysis of lightning protection with transmission line arrester using ATP/EMTP: Case of an HV 220kV double circuit line. *Proceedings IEEE Universities Power Engineering Conference (UPEC) 45th International Dept. d'Electrotech,* pp. 1-6.

Berger, K., 1978. Blitzstrom-Parameter von Aufwärtsblitzen," (Lightning Parameters for Upward Flashes), Bd. 69: 353-60., 1978.. *Bull. Schweiz. Elektrotech.,* Τόμος 69, pp. 353-360.

Berger, K., Anderson, R. B. & Kroeninger, H., 1975. Parameters of Lightning Flashes. *Electra,* Τόμος 41.

Berger, K., June 1967. Novel Observations on Lightning Discharges: Results of Research on Mount San Salvatore. Τόμος 283, pp. 478-525.

Cabral, R. J. και συν., 2012. *Analysis of distribution lines performance against lightning using ATP-EMTP.* s.l., International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE.

Christodoulou, C., Gonos, I. & Stathopulos, I., 2008. *Lightning performance of high voltage transmission lines protected ny surge arresters: a simulation for the Hellenic transmission network.* Uppsala, Sweden, 29th International Conference on Lightning Protection.

CIGRE Working Group 33.01, 1991. *Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines,* s.l.: CIGRE - Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination).

Datsios, Z. G. & Mikropoulos, P. N., 2016. Modeling of lightning impulse behavior of long air gaps and insulators including predischarge current: Implications on insulation coordination of overhead transmission lines and substations. *Electric Power Systems Research,* Τόμος 139, pp. 37-46.

Datsios, Z. G., Mikropoulos, P. N. & Thomas, T. E., 2011. *Insulator string flashover modeling with the aid of an ATPDraw object.* Soest, Germany, UPEC 2011 · 46th International Universities' Power Engineering Conference · 5-8th September 2011.

Datsios, Z. & Mikropoulos, P., 2014. *Implementation of leader development models in ATP-EMTP Using a type-94 circuit component.* Shanghai, China, s.n., pp. 979-985.

Gönen, T., 2014. *Electric Power Distribution Engineering.* s.l.:CRC Press. Taylor & Francis Group. Third Edition..

Heidler, F. & Cvetic, J., 2002. A class of analytical functions to study the lightning effects associated with the current front. *European Transactions on Electrical Power,* 12(2), p. 141–150.

Heidler, F., Cvetic, J. M. & Stanic, B. V., April 1999. Calculation of lightning current parameters. *IEEE Transactions on Power Delivery,* 14(2), pp. 399-404.

Heidler, F. και συν., 2008. *(2008) Parameters of Lightning Current Given in IEC 62305—Background, Experience and Outlook.* Uppsala, Sweden, s.n.

Jiang, J.-L., Chang, H.-C. & Kuo, C.-C., 2013. Transient overvoltage phenomena on the control system of wind turbines due to lightning strike. *Renewable Energy,* Τόμος 57, pp. 181-189.

Kim, Y. G. και συν., 2022. Effects of lightning on UAM aircraft: Complex zoning and direct effects on composite prop-rotor blade. *Aerospace Science and Technology,* 124(1).

Laboratory, H. V., 2011. *Insulator String Flashover - ISF ATPDraw object,* Thessaloniki: High Voltage Laboratory, Aristotle University of Thessaloniki.

Martinez, J. A. & Castro-Aranda, F., 2005. Lightning Performance Analysis of Overhead Transmission Lines Using the EMTP. *IEEE Transactions on Power Delivery,* 20(3), pp. 2200-2210.

Mikropoulos, P. N., Tsouris, P. P. & Miltiadous, K. E., 2023. *Modelling of the Negative Lightning Impulse Flashover of Medium Voltage Overhead Line Insulators Using ATP-EMTP.* Suzhou, China, 2023 International Symposium on Lightning Protection (XVII SIPDA), pp. 1-6.

Mikropoulos, P. & Tsouris, P., 2022. *Modelling of the positive lightning lmpulse flashover of medium voltage overhead line lnsulators using ATP/EMTP.* Cate Town, South Africa, Proceedings of 36th International Conference on Lightning Protection (ICLP).

Piantini, A., 2016. *Lightning-induced overvoltages on overhead medium-voltage lines.* Chengdu, China, 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), pp. 1-7.

Pigini, A. και συν., 1989. Performance of large air gaps under lightning overvoltages: Experimental study and analysis of accuracy of predetermination methods. *IEEE Transactions on Power Delivery,* 4(2), pp. 1379-1392.

Prikler, L. & Høidalen, H. K., 2009. *ATPDRAW Users' Manual v5.6,* Norway: Norwegian University of Technology Trondheim.

Prikler, L., Høidalen, H. K. & Peñaloza, F., 2024. *ATPDRAW Users' Manual v7.3,* Norway: Norwegian University of Technology Trondheim.

Rakov, V. A. & Uman, M. A., 2003. *Lightning: Physics and Effects.* Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.

Rubiano-Cruz, J., Paez-Moncaleano, S., Chacon-Cardona, C. & Torres-Sanchez, H., 2021. Equation of lightning return current in tropical zones. *Journal of Physics: Conference Series,* 2135(1), p. 012007.

Shivalli, S., 2016. Lightning Phenomenon, Effects and Protection of Structures from Lightning. *Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE),* 11(3), pp. 44-50.

Short, T., 2004. Traveling Waves. Στο: *Electric Power Didtribution Handbook.* s.l.:s.n.

Terespolsky, B. R., 2015. *MSc Thesis: An Approximation to the Heidler Function with an Analytical Integral for Engineering Applications Using Lightning Currents,* Johannesburg: University of the Witwatersrand .

Terespolsky, B. R., Hunt, H. G. P. & Nixon, K. J., 2024. An Approximation to the Heidler Function With an Analytical Integral. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,* pp. 1 - 15.

Vujević, S. & Lovrić, D., 2010. Exponential approximation of the Heidler function for the reproduction of lightning current waveshapes. *Electric Power Systems Research,* 80(10), pp. 1293-1298.

Wagner, C. & Hileman, A., 1961. Mechanism of Breakdown of Laboratory Gaps. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems,* 80(3), pp. 604-618.

Wang, X., Yu, Z. & He, J., 2014. Breakdown Process Experiments of 110- to 500-kV Insulator Strings Under Short Tail Lightning Impulse. *IEEE Transactions on Power Delivery,* 29(5), pp. 2394-2401.

Whitehead, J. και συν., 1993. Working Group on Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines. Estimating lightning performance of transmission lines. II. Updates to analytical models. *IEEE Transactions on Power Delivery,* 8(3), pp. 1254-1267.

Γαλανόπουλος, Δ., 2019. *Διπλωματική Εργασία: Μοντελοποίηση Μονωτήρων Υψηλής Τάσης στο δίκτυο των 400kV,* Πάτρα: Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών.

ΔΕΔΔΗΕ, 1974-2018. *Τυποποιημένες Κατασκευές Διανομής,* Αθήνα: ΔΕΔΔΗΕ.

ΔΕΔΔΗΕ, 2018. *6α-1 Τυποποιημένες Κατασκευές Διανομής,* Αθήνα: ΔΕΔΔΗΕ.

Νταλούκας, Α., 2014. *Διπλωματική Εργασία: Μοντελοποίηση Μονωτήρων Υψηλής Τάσης,* Πάτρα: Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Παναγόπουλος-Χασσούντ, Σ., 2018. *Διπλωματική Εργασία: Μελέτη Υπερτάσεων από Κεραυνούς σε Δίκτυο Μέσης και Χαμηλής Τάσης,* Πάτρα: Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Πυργιώτη, Ε., 2012. *Μονωτήρες Υψηλής Τάσης.* s.l.:Πανεπιστήμιο Πατρών.

Πυργιώτη, Ε., 2019. *Υψηλές Τάσεις.* Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.

Πυργιώτη, Ε., 2022. *Προστασία Κατασκευών από Κεραυνούς.* Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.

Σταθόπουλος, Ι., 1989. *Προστασία τεχνικών εγκαταστάσεων έναντι υπερτάσεων,* s.l.: Εκδόσεις Συμεών.

Στεργίου, Θ., 2016. *Διπλωματική Εργασία: Μεταβατική συμπεριφορά γραμμών μέσης τάσης,* Πάτρα: Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Τοπάλογλου, Ε. Δ., 2018. *Διπλωματική Εργασία: Μελέτη και προστασία γραμμής μέσης τάσης από κεραυνικό πλήγμα,* Πάτρα: Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Τσακούμης, Β. Γ., 2023. *Διπλωματική Εργασία: Μελέτη Δικτύων Μέσης Τάσης,* Πάτρα: Τμήμας Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Παράρτημα – Αποτελέσματα Δοκιμών

Σενάριο 1 (K.2.a_A)

Πρώτο

ta	PXX_Ph	Vmax	t(Vmax)	Vmin	t(Vmin)
(s)		(V)	(s)	(V)	(s)
0,001495	P01_A	71.125,0	1,8860E-05		
	P01_B	6.088,6	3,2890E-05		
	P01_C	6.218,4	3,2900E-05	-24.165,0	5,0770E-05
7,16E-05	P10_A	153.450,0	6,0700E-06		
	P10_B	30.750,0	6,7000E-06		
	P10_C	-410,5	1,0960E-04		
7,16E-05	P20_A	172.010,0	8,8600E-05		
	P20_B	29.896,0	2,5880E-05		
	P20_C	1.713,5	3,9070E-05	-40.574,0	8,0100E-06

Ακόλουθο

ta	PXX_Ph	Vmax	t(Vmax)	Vmin	t(Vmin)
(s)		(V)	(s)	(V)	(s)
0,0016154	P01_A	33.444,0	3,2467E-02		
	P01_B	6.093,0	3,2467E-02		
	P01_C	21.024,0	3,2494E-02		
4,42E-04	P10_A	34.305,0	3,2464E-02		
	P10_B	6.562,3	3,2464E-02		
	P10_C	14.478,0	3,2544E-02		
5,96E-04	P20_A	33.355,0	3,2467E-02		
	P20_B	4.148,6	3,2480E-02		
	P20_C	15.288,0	3,2500E-02		

Σενάριο 2 (K.2.a_B)

Πρώτο

ta	PXX_Ph	Vmax	t(Vmax)	Vmin	t(Vmin)
(s)		(V)	(s)	(V)	(s)
0,0013935	P01_A	31.611,0	1,7860E-05		
	P01_B	42.590,0	4,1000E-06	-23.598,0	8,0000E-06
	P01_C	2.621,6	2,7420E-05	-21.554,0	7,0890E-06
3,67E-04	P10_A	58.193,0	6,4500E-06		
	P10_B	129.170,0	6,0000E-06		
	P10_C	1.350,6	1,0916E-04		
2,63E-04	P20_A	55.642,0	2,1500E-05		
	P20_B	141.800,0	9,1600E-06	-18.415,0	3,0645E-04
	P20_C	2.886,8	8,5720E-05	-54.335,0	9,6500E-06

Ακόλουθο

ta	PXX_Ph	Vmax	t(Vmax)	Vmin	t(Vmin)
(s)		(V)	(s)	(V)	(s)
0,0012989	P01_A	-114,2	3,2467E-02		
	P01_B	41.442,0	3,2467E-02		
	P01_C	20.748,0	3,2501E-02		
3,52E-04	P10_A	1.766,9	3,2464E-02		
	P10_B	45.067,0	3,2464E-02	-18.529,0	3,0306E-04
	P10_C	16.283,0	3,2537E-02		
4,07E-04	P20_A	-322,5	3,2480E-02		
	P20_B	45.116,0	3,2467E-02		
	P20_C	17.238,0	3,5000E-02		

Σενάριο 3 (K.2.a_C)

Πρώτο

ta	PXX_Ph	Vmax	t(Vmax)	Vmin	t(Vmin)
(s)		(V)	(s)	(V)	(s)

		P01_A	23.633,0	4,2100E-06		
	5,08E-04	P01_B	2.252,2	4,1600E-06		
		P01_C	17.751,0	4,1100E-06		
		P10_A	39.829,0	6,9500E-06		
	2,65E-04	P10_B	23.685,0	6,7900E-06		
		P10_C	66.474,0	6,0400E-06		
		P20_A	38.496,0	3,1720E-05		
	2,43E-04	P20_B	21.667,0	2,5250E-05		
		P20_C	61.296,0	1,3390E-05		

Ακόλουθο	ta	PXX_Ph	Vmax	t(Vmax)	Vmin	t(Vmin)
	(s)		(V)	(s)	(V)	(s)
		P01_A	-5.508,6	3,2470E-02		
	4,19E-04	P01_B	4.717,3	3,2467E-02		
		P01_C	37.930,0	3,2467E-02		
		P10_A	-5.569,8	3,2470E-02		
	2,30E-04	P10_B	448,2	3,2464E-02		
		P10_C	35.265,0	3,2464E-02		
		P20_A	-6.613,3	3,2487E-02		
	1,98E-04	P20_B	2.431,7	3,2480E-02		
		P20_C	33.098,0	3,2467E-02		

Σενάριο 4 (K.2.b_A)

Πρώτο	ta	PXX_Ph	Vmax	t(Vmax)	Vmin	t(Vmin)
	(s)		(V)	(s)	(V)	(s)
		P01_A	392.320,0	3,5300E-06	-98.415,0	3,9500E-06
	0,0010968	P01_B	89.118,0	3,7600E-06	-60.222,0	2,3450E-05
		P01_C	57.829,0	8,0500E-06	-130.130,0	9,8800E-06
		P10_A	409.100,0	1,0200E-06	-23.694,0	5,8328E-04
	2,25E-04	P10_B	147.070,0	8,1000E-06		
		P10_C	18.358,0	1,8219E-04		
		P20_A	457.570,0	1,6360E-05	-23.522,0	5,9323E-04
	2,11E-04	P20_B	157.090,0	2,9410E-05	-60.341,0	7,1700E-06
		P20_C	39.498,0	8,3630E-05	-139.190,0	7,7500E-06

Ακόλουθο	ta	PXX_Ph	Vmax	t(Vmax)	Vmin	t(Vmin)
	(s)		(V)	(s)	(V)	(s)
		P01_A	179.320,0	3,2467E-02	-65.900,0	3,2467E-02
	0,0015382	P01_B	53.549,0	3,2467E-02	-34.745,0	3,2467E-02
		P01_C	58.601,0	3,2480E-02	-49.964,0	3,2487E-02
		P10_A	183.780,0	3,2463E-02	-28.210,0	3,2825E-02
	8,90E-04	P10_B	59.116,0	3,2470E-02		
		P10_C	22.347,0	3,2597E-02		
		P20_A	199.760,0	3,2469E-02	-28.108,0	3,2841E-02
	1,68E-04	P20_B	45.199,0	3,2487E-02	-30.127,0	3,2466E-02
		P20_C	23.616,0	3,2581E-02	-40.101,0	3,2466E-02

Σενάριο 5 (K.2.b_B)

Πρώτο	ta	PXX_Ph	Vmax	t(Vmax)	Vmin	t(Vmin)
	(s)		(V)	(s)	(V)	(s)
		P01_A	109.860,0	3,5600E-06	-24.837,0	3,6770E-05
	0,0010989	P01_B	368.690,0	3,5600E-06	-119.790,0	4,7900E-06
		P01_C	68.503,0	1,2980E-05	-147.860,0	2,3370E-05
		P10_A	373.670,0	1,0200E-06		
	1,83E-04	P10_B	384.420,0	1,0100E-06	-43.547,0	5,6281E-04
		P10_C	26.583,0	1,7524E-04	-19.394,0	1,2562E-03

	2,89E-04	P20_A	168.450,0	3,9520E-05		
		P20_B	428.550,0	8,8700E-06	5.267,4	5,6618E-04
		P20_C	43.316,0	4,6190E-06	-166.030,0	4,1100E-06
Ακόλουθο	ta	PXX_Ph	Vmax	t(Vmax)	Vmin	t(Vmin)
	(s)		(V)	(s)	(V)	(s)
	0,0012243	P01_A	46.265,0	3,2467E-02	-40.179,0	3,2467E-02
		P01_B	187.450,0	3,2467E-02	-63.291,0	3,2468E-02
		P01_C	66.925,0	3,2480E-02	-54.248,0	3,2480E-02
	2,16E-04	P10_A	158.900,0	3,2477E-02	-45.042,0	3,2474E-02
		P10_B	194.290,0	3,2463E-02	-1.987,0	3,2838E-02
		P10_C	26.583,0	1,7525E-04		
	2,65E-04	P20_A	67.530,0	3,2480E-02		
		P20_B	210.090,0	3,2470E-02	-19.765,0	3,2842E-02
		P20_C	28.554,0	3,2534E-02	-56.754,0	3,2469E-02

Σενάριο 6 (K.2.b_C)

Πρώτο	ta	PXX_Ph	Vmax	t(Vmax)	Vmin	t(Vmin)
	(s)		(V)	(s)	(V)	(s)
	0,00041227	P01_A	69.267,0	3,6700E-06	-2.800,2	4,2600E-06
		P01_B	67.698,0	3,6500E-06	-32.279,0	4,2500E-06
		P01_C	183.390,0	3,6400E-06	-79.010,0	4,2500E-06
	0,00025058	P10_A	98.790,0	1,4260E-05		
		P10_B	89.925,0	2,0610E-05		
		P10_C	195.500,0	9,7000E-07		
	0,00024237	P20_A	90.488,0	3,0660E-05		
		P20_B	84.907,0	2,3870E-05		
		P20_C	214.620,0	1,3720E-05		
Ακόλουθο	ta	PXX_Ph	Vmax	t(Vmax)	Vmin	t(Vmin)
	(s)		(V)	(s)	(V)	(s)
	0,00056109	P01_A	15.365,0	3,2467E-02		
		P01_B	33.804,0	3,2467E-02		
		P01_C	111.010,0	3,2467E-02		
	0,00042596	P10_A	26.271,0	3,2470E-02		
		P10_B	38.768,0	3,2470E-02		
		P10_C	110.670,0	3,2463E-02		
	0,00039711	P20_A	19.290,0	3,2487E-02		
		P20_B	34.918,0	3,2487E-02		
		P20_C	109.480,0	3,2467E-02		